

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ  
ΑΣΚΗΣΕΙΣ

# ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ



**ΞΑΝΘΙΠΠΗ ΖΙΑΝΝΗ**

Καθηγήτρια Φυσικής

Τμήμα Αεροδιαστημικής

Επιστήμης και Τεχνολογίας

ΕΚΠΑ

Οι παρούσες εργαστηριακές ασκήσεις σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν για το εργαστηριακό μάθημα **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΦΥΣΙΚΗΣ (ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ - ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ)** του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του τμήματος Αεροδιαστημικής Επιστήμης και Τεχνολογίας (ΑΕΤ) της Σχολής Θετικών Επιστημών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (ΕΚΠΑ).

Ευχαριστώ τους Γεώργιο Δόγκα (Μεταδιδακτορικός Συνεργάτης ΑΕΤ) και Σωτήριο Σιαμπάνη (Ε.Τ.Ε.Π. ΑΕΤ) για την σημαντική συνεισφορά τους στην προετοιμασία της πρώτης διδασκαλίας των εργαστηριακών ασκήσεων το ακαδημαϊκό έτος 2021-2022.

Ξανθίππη Ζιάννη  
Διδάκτωρ Φυσικής  
Καθηγήτρια Φυσικής  
ΕΚΠΑ

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

	ΣΕΛΙΔΑ
Μέτρηση Θερμοκρασίας - Ειδική Θερμότητα μετάλλων	3
Νόμοι των αερίων	11
Μελέτη της ειδικής θερμότητας των αερίων – Μέθοδος Ruchhardt	20
Μελέτη της ειδικής θερμότητας των αερίων – Αδιαβατική συμπίεση	24
Θερμιδομετρία – Μεταφορά Θερμότητας	35
Θερμική αγωγιμότητας στερεών υλικών	48
Μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας	53
Μηχανικό ισοδύναμο της Θερμότητας	66
Θερμικές μηχανές	73
Μηχανή Stirling	81

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί η ειδική θερμότητα (ή ειδική θερμοχωρητικότητα) μεταλλικού σώματος, μέσω μέτρησης θερμοκρασίας, και με βάση αυτήν να προσδιοριστεί η ταυτότητα του μετάλλου.

### Περιγραφή

Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την μέτρηση της μεταβολής της θερμοκρασίας μιας γνωστής ποσότητας νερού περίπου 50 °C, όταν ένα μεταλλικό σώμα γνωστής μάζας και γνωστής αρχικής θερμοκρασίας τοποθετείται σε νερό. Η ακρίβεια του αισθητήρα θερμοκρασίας είναι μερικά εκατοστά του βαθμού. Αυτή η διαδικασία επιτρέπει τον προσδιορισμό της ειδικής θερμότητας με ακρίβεια 1-2 %. Ο περιορισμός της αρχικής θερμοκρασίας του νερού βελτιώνει την ακρίβεια (βλ. συζήτηση στο θεωρητικό υπόβαθρο) και ελαχιστοποιεί την πιθανότητα ατυχημάτων. Η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της ειδικής θερμότητας θα εκτιμηθεί και θα εξεταστεί πώς αυτή επιδρά στην ταυτοποίηση του υλικού.

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Η ειδική θερμότητα  $c$  ενός υλικού είναι η ποσότητα θερμότητας που πρέπει να απορροφήσει η μονάδα μάζας του (1gr) προκειμένου να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά ένα βαθμό (Celsius ή Kelvin). Η ειδική θερμότητα του νερού, για παράδειγμα, είναι  $c_{water} = 4.186 \text{ J}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ . Δηλαδή: 4.186 J θερμότητας απαιτούνται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 g νερού κατά 1 °C. Ισχύει ότι:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα που απαιτείται για την μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T$  υλικού με ειδική θερμότητα  $c$  και μάζα  $m$ .

Εάν δεν υπάρχουν απώλειες προς το περιβάλλον, όταν προσθέτουμε ένα κρύο μέταλλο σε χλιαρό νερό, η θερμότητα που λαμβάνεται από το μέταλλο,  $Q_M$ , ισούται με τη θερμότητα που αποβάλλεται από το νερό,  $-Q_w$ , και έχουμε:

$$Q_M = -Q_w = c_M \cdot m_M \cdot \Delta T_M = -c_w \cdot m_w \cdot \Delta T_w \quad (2)$$

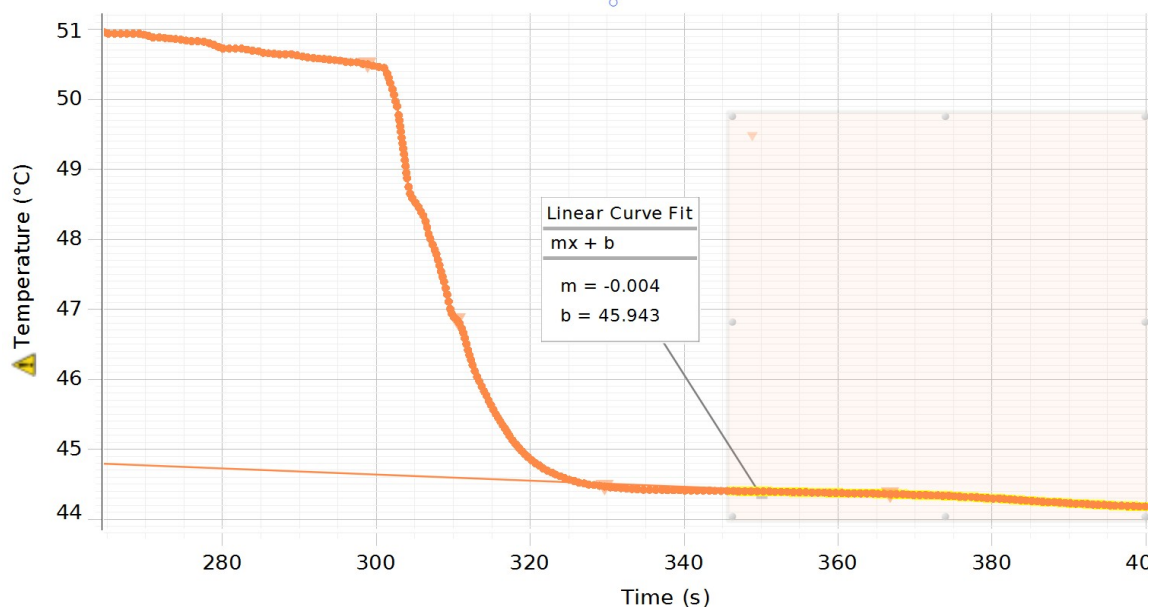
Επιλύοντας ως προς την ειδική θερμότητα του μετάλλου:

$$c_M = c_w \cdot (m_w / m_M) \cdot (-\Delta T_w / \Delta T_M) \quad (3)$$

Δεδομένου ότι η ειδική θερμότητα του νερού είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των μετάλλων που μελετούμε, η μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού θα είναι μικρή γεγονός που περιορίζει την ακρίβεια του πειραματικού προσδιορισμού. Για να μεγιστοποιήσουμε την  $\Delta T_w$ , πρέπει να κρατήσουμε τη μάζα νερού όσο το δυνατόν

μικρότερη και την αρχική διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του κρύου μετάλλου και του ζεστού νερού όσο το δυνατόν πιο μεγάλη. Ωστόσο, υπάρχει μια επιπλέον δυσκολία. Όταν το δοχείο του θερμιδόμετρου ανοίγει για να τοποθετηθεί το μέταλλο, ο κορεσμένος ατμός από το νερό χάνεται στον περιβάλλον (ο ατμός φαίνεται να ανέρχεται από το δοχείο). Για νερό 80 °C, αυτό σημαίνει πτώση της θερμοκρασίας περίπου 0,5 °C. Δεδομένου ότι η συνολική μεταβολή θερμοκρασίας του νερού είναι μόνο 5 °C περίπου, αυτό εισάγει ένα σοβαρό σφάλμα. Αυτό το σφάλμα μπορεί να περιοριστεί αποτελεσματικά χρησιμοποιώντας νερό όχι θερμότερο από περίπου 50 °C.

Επιπλέον, το θερμιδόμετρο δεν είναι εντελώς απομονωμένο από το περιβάλλον. Αυτό φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 1. Το καπάκι του θερμιδόμετρου είναι εκτός του δοχείου έως ότου το μεταλλικό δείγμα προστεθεί περίπου στα 301 s. Το θερμιδόμετρο στη συνέχεια καλύπτεται με το καπάκι και το σύστημα φτάνει σε ισορροπία στα 340 s. Κατά την διάρκεια αυτού του διαστήματος των 40 δευτερολέπτων, το νερό στο θερμιδόμετρο θα έχει κρυώσει κατά αρκετά δέκατα του βαθμού λόγω απωλειών προς το δωμάτιο. Αυτό διορθώνεται προσαρμόζοντας μια ευθεία γραμμή στα δεδομένα από 340 s έως 400 s. Χρησιμοποιούμε αυτήν την γραμμή και την προεκτείνουμε προς τα πίσω μέχρι τα 301 δευτερόλεπτα για να βρούμε την θερμοκρασία ισορροπίας που θα είχε υπήρχε αν η ισορροπία είχε συμβεί στιγμιαία, προτού συμβεί οποιαδήποτε απώλεια προς το δωμάτιο.



Σχήμα 1. Καμπύλη ψύξης για αλουμίνιο που προστίθεται σε ζεστό νερό.

## Ρυθμίσεις

1. Ζυγίστε το φελιζολένιο (Styrofoam) θερμιδομετρικό δοχείο. Κάντε κλικ στο εικονίδιο αριθμομηχανή (Calculator) στην αριστερή πλευρά της οθόνης για να ανοίξετε την αριθμομηχανή. Στην πρώτη γραμμή, όπου λέει "m cal" = 20.8, αντικαταστήστε το 20.8 με τη μάζα σε γραμμάρια που μετρήσατε για το θερμιδομετρικό δοχείο.
2. Ζυγίστε κάθε ένα από τα μεταλλικά δείγματα με τα οποία θα πραγματοποιηθούν τα πειράματα. Προσέξτε ότι κάθε μέταλλο έχει 'σταμπαριστεί' με ένα γράμμα (A, B, C, D, E). Ανοίξτε την καρτέλα "Δεδομένα" και καταγράψτε τη μάζα μετάλλου (Metal Mass) στην γραμμή που αντιστοιχεί στο γράμμα του δείγματος.
3. Συνδέστε ένα νήμα 15 cm σε κάθε ένα από τα μεταλλικά δείγματα που θα μελετήσετε. Βυθίστε το μεταλλικό δείγμα σε λουτρό πάγου. Πρέπει ο πάγος να επιπλέει στο μπάνιο, αλλά να μην αγγίζει το μέταλλο. Αυτό θα επιτρέψει στο μέταλλο να έρθει σε μια καλά καθορισμένη θερμοκρασία περίπου 2 °C. Προσπαθήστε να κρατήσετε όσο το δυνατόν περισσότερο τμήμα από το νήμα έξω από το νερό (Σχήμα 2).
4. Θερμάνετε περίπου 500 ml νερού σε θερμοκρασία περίπου 55 °C, αλλά όχι περισσότερο.
5. Συνδέστε τον αισθητήρα θερμοκρασίας σε μία από τις εισόδους της συσκευής PASPORT 850 Universal Interface (Σχήμα 3).



Σχήμα 2. Λουτρό πάγου.

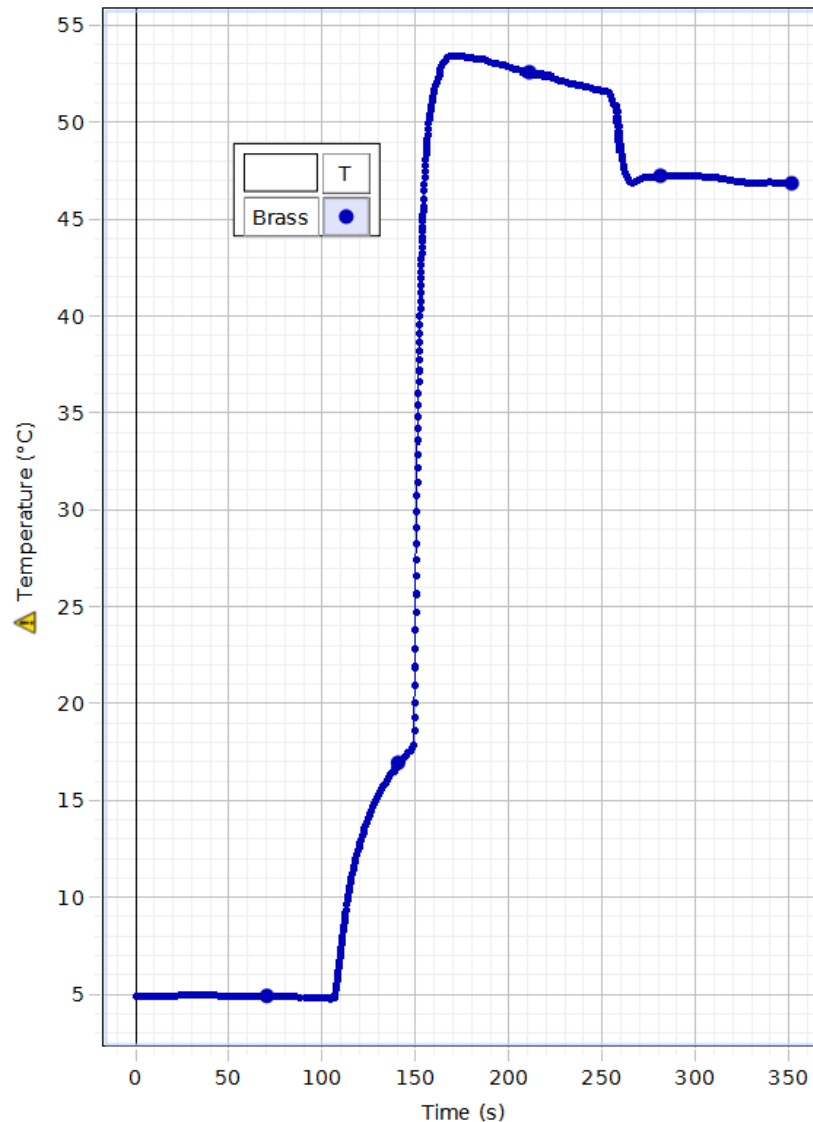


Σχήμα 3. Η διάταξη πριν την προσθήκη του μετάλλου.

## Εκτέλεση της άσκησης

1. Τοποθετήστε το μεταλλικό άκρο του αισθητήρα θερμοκρασίας ώστε να είναι σε καλή επαφή με το μεταλλικό δείγμα που πρόκειται να μετρήσετε, ενώ το δείγμα πρέπει να βρίσκεται ακόμη στο λουτρό πάγου. Ο καλύτερος τρόπος για να το επιτύχετε αυτό είναι να πιέσετε απαλά το άκρο μέσα στην τρύπα του μετάλλου όπου δένεται το νήμα.

2. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Record”. Διατηρήστε το μεταλλικό άκρο του αισθητήρα σε επαφή με το μέταλλο για τουλάχιστον 60 δευτερόλεπτα έως ότου η ένδειξη παραμείνει σταθερή (Σχήμα 4). ΜΗΝ ΣΤΑΜΑΤΗΣΕΤΕ ΤΗΝ ΕΓΓΡΑΦΗ!






Σχήμα 4. Καταγραφή θερμοκρασίας σε σχέση με τον χρόνο.

3. Μεταφέρετε νερό από την δεξαμενή ζεστού νερού στον θερμιδομετρικό δοχείο. Εάν μελετάτε το δείγμα Β, χρησιμοποιήστε περίπου 125 ml νερού. Για όλες τις άλλες περιπτώσεις χρησιμοποιήστε περίπου 90 ml νερού. Χρειαζόμαστε αρκετό νερό για να καλύψουμε το δείγμα, αλλά θα έχουμε καλύτερα αποτελέσματα εάν χρησιμοποιήσουμε όσο λιγότερο νερό μπορούμε.
4. Τοποθετήστε τον μεταλλικό άκρο του αισθητήρα θερμοκρασίας μέσα από την εξωτερική οπή στο καπάκι. Εισάγετε το μεταλλικό άκρο του αισθητήρα στο νερό, αλλά αφήστε το καπάκι πλάγια, ώστε να μην καλύπτει το θερμιδομετρικό δοχείο (Σχήμα 3).


5. Παρακολουθήστε την θερμοκρασία στο γράφημα. Μόλις φτάσει στην ισορροπία (περίπου 50 °C) αφήστε το να συνεχίσει για τουλάχιστον 60 s. ΜΗΝ ΣΤΑΜΑΤΗΣΕΤΕ ΤΗΝ ΕΓΓΡΑΦΗ!
6. Αυτό το μέρος του πειράματος πρέπει να γίνει γρήγορα! Χρησιμοποιώντας το νήμα, αφαιρέστε το μεταλλικό δείγμα από το λουτρό πάγου. ΜΗΝ ΑΓΓΙΖΕΤΕ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΜΕ ΤΑ ΧΕΡΙΑ ΣΑΣ! Χρησιμοποιώντας μια πετσέτα ή απορροφητικό χαρτί στεγνώστε γρήγορα το μέταλλο και στην συνέχεια με το νήμα τοποθετήστε το στο θερμοδομετρικό δοχείο, βάζοντας το μέταλλο ξαπλωτό ώστε να καλύπτεται εντελώς από το νερό. Κλείστε το δοχείο με το καπάκι αμέσως μετά.
7. Ανακατέψτε απαλά το νερό κουνώντας το δοχείο μέχρι να φτάσει σε ισορροπία. Αφήστε την εγγραφή να συνεχιστεί για τουλάχιστον 120 δευτερόλεπτα.
8. Σταματήστε την εγγραφή.
9. Κάντε κλικ στο εικονίδιο " Data Summary " στα αριστερά της σελίδας. Κάντε διπλό κλικ στον αριθμό 'εκτέλεσης' (Run) και πληκτρολογήστε Sample A (ή B ή ό,τι άλλο) για να ονομάσετε την συγκεκριμένη εκτέλεση. Κάντε ξανά κλικ στο εικονίδιο "Data Summary" για να το κλείσετε.
10. Αφαιρέστε το καπάκι και το μεταλλικό άκρο του αισθητήρα θερμοκρασίας από το θερμοδομετρικό δοχείο και προσπαθήστε να τινάξετε το νερό που είχε μείνει πάνω στον αισθητήρα με τέτοιο τρόπο ώστε να πέσει μέσα στο δοχείο. Βρείτε τη συνολική μάζα του δοχείου (χωρίς καπάκι) συν το μεταλλικό δείγμα συν το νερό και εισάγετε την στη στήλη " Total Mass " του πίνακα " Specific Heat Data " στην καρτέλα "Δεδομένα". Βεβαιωθείτε ότι εισάγετε στην γραμμή που αντιστοιχεί στο δείγμα του πειράματος σας με το κατάλληλο γράμμα .
11. Επαναλάβετε τα βήματα 1-10 για κάθε δείγμα που μελετάτε.

## Συλλογή Δεδομένων - Επεξεργασία μετρήσεων

1. Ανοίξτε την καρτέλα "Γράφημα". Κάντε κλικ στο εικονίδιο "Εμφάνιση Δεδομένων" () και επιλέξτε μία από τις εκτελέσεις σας (για παράδειγμα Sample B).
2. Κάντε κλικ στο εικονίδιο "Επισήμανσης Δεδομένων" (). Σύρετε τις λαβές του πλαισίου επισήμανσης που εμφανίζεται και επιλέξτε τα δεδομένα όπου η θερμοκρασία του μεταλλικού άκρου του αισθητήρα ήταν σε επαφή με το μεταλλικό δείγμα μέσα στο λουτρό πάγου.
3. Κάντε κλικ στο κουμπί Scale to Fit () επάνω αριστερά. Αυτό θα προσαρμόσει την κλίμακα, ώστε αυτό το τμήμα από τα δεδομένα να γεμίσει την οθόνη. Πιθανά θα δείτε ότι η θερμοκρασία αλλάζει λίγο όταν την βλέπετε από αυτήν την κλίμακα. Αυτό δεν είναι κρίσιμο αφού τα αποτελέσματα δεν είναι πολύ ευαίσθητα σε αυτήν την τιμή και η γνώση της με ακρίβεια ενός δεκάτου του βαθμού ή κάπου τόσο είναι αρκετή. Διαβάστε την θερμοκρασία του μετάλλου την στιγμή που αφαιρέσατε το μέταλλο από το παγωμένο νερό.



Εισάγετε αυτήν την τιμή στην στήλη “Metal Temp” στην καρτέλα “Δεδομένα”. Βεβαιωθείτε ότι εισάγετε στη σειρά που αντιστοιχεί στο γράμμα του δείγματος σας. Στην συνέχεια επιστρέψτε στην καρτέλα “Γράφημα”.

4. Κάντε κλικ οπουδήποτε στο πλαίσιο επισήμανσης για να το επισημάνετε και στην συνέχεια, κάντε κλικ στο εικονίδιο “Delete Active Element” (✖) για να διαγράψετε το πλαίσιο επισήμανσης. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Scale to Fit”. Θα πρέπει τώρα να βλέπετε ολόκληρο το γράφημα.
5. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Επισήμανση Δεδομένων”. Σύρετε τις λαβές του πλαισίου επισήμανσης για να επιλέξετε τα 10 s πριν τοποθετήσετε το μέταλλο και συμπεριλάβετε 10 δευτερόλεπτα αφού τοποθετήθηκε το μέταλλο. Κάντε κλικ στο εργαλείο “Scale to Fit”. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Delete Active Element” για να διαγράψετε το πλαίσιο επισήμανσης. Τώρα επαναλάβετε τη διαδικασία. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Επισήμανση Δεδομένων”. Σύρετε τις λαβές του πλαισίου επισήμανσης για να επιλέξετε το 1 s πριν τοποθετήσετε το μέταλλο και συμπεριλάβετε 1 δευτερόλεπτο αφού τοποθετήσατε το μέταλλο. Κάντε κλικ στο εργαλείο “Scale to Fit”. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Delete Active Element” για να διαγράψετε το πλαίσιο επισήμανσης. Τώρα θα πρέπει να μπορείτε να διαβάσετε τον χρόνο και την θερμοκρασία όταν το μέταλλο μπήκε στο νερό. Καταγράψτε την θερμοκρασία στο πλησιέστερο 1/100 του βαθμού και γράψτε την κάτω από την καρτέλα “Δεδομένα” στην στήλη “Water Temp” και την γραμμή για το δείγμα σας. Καταγράψτε την ώρα στο πλησιέστερο 0.1 του δευτερολέπτου.
6. Κάντε κλικ στο εργαλείο “Scale to Fit” για να επιστρέψετε στην προβολή πλήρους οθόνης. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Επισήμανση Δεδομένων”. Σύρετε τις λαβές του πλαισίου επισήμανσης για να επιλέξετε τα δεδομένα από λίγο πριν τοποθετήσετε το μέταλλο μέχρι το τέλος των δεδομένων. Κάντε κλικ στο εργαλείο “Scale to Fit”. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Delete Active Element” για να διαγράψετε το πλαίσιο επισήμανσης.
7. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Επισήμανση Δεδομένων”. Σύρετε τις λαβές του πλαισίου για να επιλέξετε τα δεδομένα από όπου το σύστημα έχει φτάσει στην ισορροπία μέχρι το τέλος των δεδομένων. Βεβαιωθείτε ότι οι άνω λαβές είναι ακριβώς πάνω από τη γραμμή. Κάντε κλικ στο μαύρο τρίγωνο στο εργαλείο “Curve Fit” (  ) και επιλέξτε “Linear”. Κάντε κλικ κάπου έξω από το μαύρο κουτί.
8. Διαβάστε τη θερμοκρασία για την ευθεία γραμμή κατά την στιγμή που σημειώσατε στο βήμα 5 παραπάνω, όταν προστέθηκε το μέταλλο. Αυτή είναι η θερμοκρασία που θα είχε το σύστημα αν είχε επιτευχθεί ισορροπία πολύ γρήγορα, προτού χαθεί θερμότητα προς το περιβάλλον. Είναι χρήσιμο να επεκτείνετε την κατακόρυφη κλίμακα. Μετακινήστε τον κέρσορα-χέρι πάνω από έναν από τους αριθμούς στο κάτω μέρος της κατακόρυφης κλίμακας. Θα πρέπει να εμφανιστεί ένα ζευγάρι από βέλη. Κάντε κλικ και σύρετε προς τα πάνω μέχρι το εύρος της κατακόρυφης κλίμακας να είναι περίπου 1 βαθμός. Θα πρέπει τώρα να είστε σε θέση να διαβάσετε την θερμοκρασία όταν προστέθηκε το μέταλλο μέσα σε μερικά 1/100 του βαθμού. Καταγράψτε αυτήν την τιμή στην καρτέλα “Δεδομένα” στην στήλη “Equil. Temp” και στην αντίστοιχη γραμμή για το δείγμα σας.

9. Αβεβαιότητα: η αβεβαιότητα εδώ οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου στην αβεβαιότητα προσδιορισμού της θερμοκρασίας ισορροπίας. Όταν εξετάζετε το γράφημα από το βήμα 8 παραπάνω, η θερμοκρασία μετά την ισορροπία πιθανώς δεν φαίνεται ευθεία όταν προβάλλεται σε αυτήν την κλίμακα. Ρυθμίστε τις λαβές του πλαισίου επισήμανσης για να επιλέξετε διαφορετικά τμήματα της καμπύλης μετά την ισορροπία και δείτε πώς αυτό θα επηρέαζε την τιμή που μετρήσατε στο βήμα 8. Από αυτό, εκτιμήστε την αβεβαιότητα στην μέτρηση της θερμοκρασίας ισορροπίας. Για παράδειγμα, μπορεί να πάρετε την υψηλότερη τιμή που βρίσκετε μείον τη χαμηλότερη τιμή και να διαιρέσετε δια δύο για να λάβετε μια εκτίμηση της αβεβαιότητας. Μπορείτε επίσης να αντικαταστήσετε την τιμή που μετρήσατε για την θερμοκρασία ισορροπίας στο βήμα 8 με την τιμή στο κέντρο του εύρους στο βήμα 9. Καταγράψτε την εκτίμησή σας για την αβεβαιότητα στην στήλη “ΔΤ” στην καρτέλα “Δεδομένα”.
10. Η μεταβολή της θερμοκρασίας του μεταλλικού δείγματος δίνεται στη στήλη “Del T Metal” στην καρτέλα “Δεδομένα”. Η αρνητική μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού δίνεται στη στήλη “-Del T Water”. Χρησιμοποιήστε τα δεδομένα του πίνακα “Specific Heat Data” στην καρτέλα “Δεδομένα” για να υπολογίσετε την ειδική θερμότητα  $c$  του μετάλλου χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3 από την καρτέλα “Θεωρητικό Υπόβαθρο”. Καταγράψτε την τιμή που υπολογίσατε στον πίνακα “Specific Heat” στην καρτέλα “Συμπεράσματα A” στην γραμμή που αντιστοιχεί στο δείγμα σας.
11. Δεδομένου ότι η “-Del T Water” είναι μικρή, η αβεβαιότητα στην ειδική θερμότητα οφείλεται σχεδόν εξ ολοκλήρου σε αυτήν την μέτρηση και το ποσοστό (%) της αβεβαιότητας στην ειδική θερμότητα ισούται με το ποσοστό (%) της αβεβαιότητας στην “-Del T Water”. Ομοίως, η αβεβαιότητα στην “-Del T Water” οφείλεται σχεδόν πλήρως στην αβεβαιότητα στην “Equil. Temp.”, επομένως “ΔΤ”. Αυτό σημαίνει ότι:
- $$\delta c/c = \delta T / (-\text{Del T Water})$$
- Ή λύνοντας ως προς την αβεβαιότητα στην ειδική θερμότητα,  $\delta c$ , παίρνουμε :
- $$\delta c = c \cdot \delta T / (-\text{Del T Water}) \quad (4)$$
12. Χρησιμοποιήστε την Εξίσωση 4 για να υπολογίσετε την αβεβαιότητα στην ειδική θερμότητα και να την εισάγετε στην στήλη “ $\delta c$ ” στην καρτέλα “Συμπεράσματα A”.
13. Κάντε κλικ στο μαύρο τρίγωνο του “Curve Fit” και απενεργοποιήστε το “Linear”. Κάντε κλικ οπουδήποτε στο πλαίσιο επισήμανσης για να το επισημάνετε, στην συνέχεια κάντε κλικ στο εικονίδιο “Delete Active Element” για να καταργήσετε το πλαίσιο επισήμανσης. Κάντε κλικ στο εργαλείο “Scale to Fit” για να επιστρέψετε στην προβολή πλήρους σελίδας.
14. Επαναλάβετε τα βήματα 1-13 για καθένα από τα δείγματα που θα μελετήσετε.

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Ο πίνακας δείχνει ορισμένες ειδικές θερμότητες κοινών μετάλλων. Χρησιμοποιώντας μόνο τα αποτελέσματά σας για την ειδική θερμότητα, προσπαθήστε να προσδιορίσετε καθένα από τα μεταλλικά σας δείγματα. Εισάγετε την ονομασία των μετάλλων στην στήλη “Type of Metal” του πίνακα “Specific Heat” παραπάνω. Εάν υπάρχουν περισσότερες από μία πιθανότητες, εισάγετε και τις δύο. Εάν τίποτα δεν ταιριάζει εισάγετε "κανένα".
2. Γιατί είναι σημαντικό να εκτιμήσετε την αβεβαιότητα όταν κάνετε μια μέτρηση της ειδικής θερμότητας;
3. Γιατί είναι σημαντικό να είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του νερού όσο μεγαλύτερη γίνεται;  
Υπόδειξη: εξετάστε την Εξίσωση 4 από την καρτέλα “Ανάλυση”. Γιατί οι άλλες μετρήσεις δεν είναι τόσο σημαντικές;
4. Πώς σχετίζεται ειδική θερμότητα με το πόσο εύκολο είναι να μεταβληθεί η θερμοκρασία ενός υλικού;
5. Γιατί είναι σημαντικό η ειδική θερμότητα του νερού να είναι τόσο υψηλή;  
Υπόδειξη: Από τι αποτελείται κυρίως η επιφάνεια της Γης;
6. Εάν όλες οι τιμές σας για την ειδική θερμότητα είναι πάρα πολύ χαμηλές, πώς θα το εξηγήσατε;

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να μελετηθούν ταυτόχρονες μεταβολές της θερμοκρασίας, του όγκου και της πίεσης αερίου σύμφωνα με την καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου. Θα μελετηθούν επίσης η ισόχωρη μεταβολή και η ισόθερμη μεταβολή.

### Πειραματικός Εξοπλισμός

Θα χρησιμοποιήσουμε συσκευή μελέτης του ιδανικού αερίου που επιτρέπει ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας και πίεσης ενός αερίου καθώς συμπιέζεται. Επίσης η συσκευή διαθέτει σφαίρα σταθερού όγκου με αισθητήρες θερμοκρασίας και πίεσης (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Συσκευή για την μελέτη του ιδανικού αερίου.

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Το 1662, ο Robert Boyle ανακάλυψε ότι το γινόμενο της πίεσης ( $P$ ) και του όγκου ( $V$ ) ενός αερίου σε σταθερή θερμοκρασία είναι σταθερό.

$$PV = k_1 \quad (1)$$

όπου,  $k_1$  είναι μια σταθερά. Επομένως, η πίεση και ο όγκος είναι αντιστρόφως ανάλογα.

Το 1787, ο Jacques Charles επαλήθευσε πειραματικά ότι ο όγκος και η θερμοκρασία ( $T$ ) ενός αερίου σε σταθερή πίεση είναι ευθέως ανάλογα.

$$V = k_2 T \quad (2)$$

όπου,  $k_2$  είναι μια σταθερά.

Το 1802, ο Joseph Gay-Lussac ανακάλυψε την αναλογία μεταξύ της πίεσης και της θερμοκρασίας ενός αερίου με σταθερό όγκο:

$$P=k_3T \quad (3)$$

όπου,  $K_3$  είναι μια σταθερά.

Η καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου συνδυάζει τις τρεις παραπάνω συσχετίσεις. Συνδέει την απόλυτη πίεση ( $P$ ) και τον όγκο ( $V$ ) ενός αερίου με την απόλυτη θερμοκρασία ( $T$ ) σε βαθμούς Kelvin.

$$PV=nRT \quad (4)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός γραμμομορίων αερίου και  $R$  είναι η σταθερά του ιδανικού αερίου.

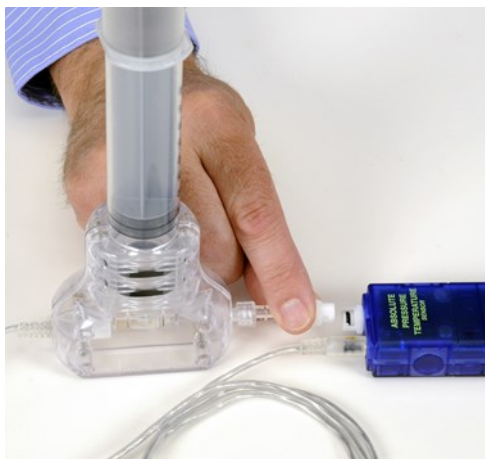
## Μέρος Πρώτο – Ιδανικό Αέριο

### Ρυθμίσεις

Η σύριγγα της καταστατικής εξίσωσης ιδανικού αερίου επιτρέπει ταυτόχρονη μέτρηση θερμοκρασίας και πίεσης ενός αερίου καθώς συμπιέζεται. Το βύσμα (stereo jack 3.5 mm) συνδέεται με ένα θερμίστορ μικρής θερμικής αδράνειας το οποίο είναι κολλημένο στο άκρο της σύριγγας για να μετράει θερμοκρασιακές αλλαγές μέσα στην σύριγγα. Το βύσμα μπαίνει κατευθείαν στον αισθητήρα.

Ο λευκός πλαστικός ταχυσύνδεσμος των σωληνώσεων συνδέεται στην μέτρησης πίεσης του αισθητήρα: Με μια ελαφρά περιστροφή κλειδώνει στην θύρα (Σχήμα 2). Αυτός ο λευκός πλαστικός ταχυσύνδεσμος μπορεί να αποσυνδεθεί και να επανασυνδεθεί κατά την διάρκεια του πειράματος για να επιτρέψει διαφορετικές αρχικές θέσεις του εμβόλου. Όλα τα διάφανα πλαστικά εξαρτήματα είναι κολλημένα και δεν μπορούν να αφαιρεθούν.

Το έμβολο είναι εξοπλισμένο με μηχανικό στοπ που προστατεύει το θερμίστορ και επιτρέπει επίσης μια γρήγορη, προκαθορισμένη αλλαγή του όγκου. Ποτέ μην χτυπάτε το έμβολο κάτω προς το τραπέζι. Πάντα να κρατάτε την σύριγγα και το έμβολο όπως φαίνεται στο Σχήμα 3 όταν πρόκειται να συμπιέσετε το αέριο.



Σχήμα 2. Σύνδεση του αισθητήρα.



Σχήμα 3. Συμπίεση της σύριγγας.

## Εκτέλεση της άσκησης

1. Αποσυνδέστε τον ταχυσύνδεσμο από τον αισθητήρα. Πιέστε το έμβολο της σύριγγας μέχρι το τέρμα, έως ότου η λαβή του εμβόλου να βρει στο μηχανικό στοπ. Καταγράψτε αυτόν τον ελάχιστο όγκο. Πρέπει να είναι κοντά στα 20 cc.
2. Ρυθμίστε το έμβολο στα 40 cc και καταγράψτε την τιμή στον Πίνακα Ι (“Table I”) και στην συνέχεια συνδέστε ξανά τον ταχυσύνδεσμο στον αισθητήρα.

ΠΙΝΑΚΑΣ Ι: Όγκος σύριγγας

Αρχικός όγκος (ml)	Τελικός όγκος (ml)

3. Ξεκινήστε την εγγραφή δεδομένων. Συμπιέστε γρήγορα το έμβολο μέχρι τέρμα και κρατήστε το συμπιεσμένο. Η λαβή του εμβόλου πρέπει να βρίσκεται στο στοπ.
4. Παρακολουθήστε τις γραφικές παραστάσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας και συνεχίστε να κρατάτε το έμβολο μέχρι να μην αλλάζουν πλέον οι ενδείξεις. Αυτό θα διαρκέσει περίπου 10 δευτερόλεπτα.
5. Όταν η θερμοκρασία και η πίεση σταθεροποιηθούν, αφήστε το έμβολο. Και πάλι, παρακολουθήστε τις γραφικές παραστάσεις και περιμένετε έως ότου οι ενδείξεις να μην αλλάζουν πλέον.
6. Διακόψτε την συλλογή δεδομένων.

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Κοιτάξτε τα διαγράμματα πίεσης και θερμοκρασίας. Συσχετίστε τις αλλαγές στην πίεση και την θερμοκρασία με την κίνηση του εμβόλου.

2. Τι συνέβη στην θερμοκρασία όταν συμπιέστηκε ο αέρας; Γιατί;

3. Ποια είναι η θερμοκρασία ισορροπίας του αερίου όταν συμπιέστηκε; Γιατί; Ποια είναι η πίεση ισορροπίας; Γιατί δεν επιστρέφει στην αρχική πίεση;

4. Τι συνέβη στην θερμοκρασία κατά την διάρκεια της εκτόνωσης (όταν απελευθερώσατε το έμβολο); Γιατί; Είναι μικρότερη από την θερμοκρασία δωματίου; Μειώνεται η πίεση κάτω από την αρχική πίεση; Τι θα έπρεπε να κάνετε για να συμβεί αυτό;

5. Μετρήστε την αρχική θερμοκρασία ( $T_1$ ) και την πίεση ( $P_1$ ) του αερίου από τα δεδομένα σας λίγο πριν το συμπιέσετε. Μπορείτε να επισημάνετε μια περιοχή (κάντε κλικ και σύρετε) στο διάγραμμα και αυτά δεδομένα θα εμφανιστούν στον πίνακα δεδομένων. Αυτά τα δεδομένα αντιστοιχούν σε έναν αρχικό όγκο ( $V_1$ ) 40 cc.

6. Επισημάνετε την περιοχή στο διάγραμμα θερμοκρασίας όπου αυτή μεγιστοποιείται. Επιλέξτε το μέρος όπου η θερμοκρασία μεγιστοποιείται, όχι η πίεση. Χρειάζεται ο αισθητήρας θερμοκρασίας περίπου 1/2 δευτερόλεπτο για να ανταποκριθεί. Καταγράψτε την μέγιστη θερμοκρασία ( $T_2$ ) και την μέγιστη πίεση ( $P_2$ ). Αυτά τα δεδομένα αντιστοιχούν στον όγκο ( $V_2$ ) των 20 cc. Σημείωση: Εάν ο συμπιεσμένος όγκος που φαίνεται στην σύριγγα είναι διαφορετικός από 20 cc, χρησιμοποιήστε αυτήν την διαφορετική τιμή.

7. Χρησιμοποιήστε την καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου για να δείξετε ότι η αναλογία όγκων μπορεί να εκφραστεί ως:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1 P_2}{T_2 P_1}$$

όπου ο δείκτης 1 αναφέρεται στην αρχική κατάσταση (όγκος = 40 cc) και ο δείκτης 2 αναφέρεται στην τελική κατάσταση (όγκος = 20 cc) μετά τη συμπίεση.

8. Χρησιμοποιήστε τις τιμές πίεσης και θερμοκρασίας για να υπολογίσετε τον λόγο των όγκων. Να συγκρίνετε τον λόγο αυτόν με τον πραγματικό λόγο; Είναι περίπου ίδιοι;

## Μέρος Δεύτερο – Σταθερή Θερμοκρασία

### Εκτέλεση της άσκησης

1. Αποσυνδέστε τον ταχυσύνδεσμο από τον αισθητήρα. Ρυθμίστε το έμβολο στα 50 cc και στην συνέχεια, συνδέστε ξανά τον ταχυσύνδεσμο στον αισθητήρα.
2. Ξεκινήστε εγγραφή των δεδομένων. Πιέστε το έμβολο στα 45 cc και κρατήστε το σε αυτήν τη θέση. Παρακολουθήστε την θερμοκρασία στην ψηφιακή οθόνη και περιμένετε μέχρι να πέσει κοντά στην θερμοκρασία δωματίου. Σημειώστε την τελική θερμοκρασία. Κάθε φορά που συμπιέζετε τον αέρα με αυτήν τη σειρά, περιμένετε έως ότου η θερμοκρασία επιστρέψει κοντά σε αυτήν την τιμή.
3. Συμπιέστε το έμβολο στα 40 cc και κρατήστε το σε αυτήν τη θέση. Παρακολουθήστε την θερμοκρασία και κρατήστε το έμβολο στα 40 cc έως ότου η θερμοκρασία πέσει στην τιμή που σημειώσατε στο βήμα 2. Μην απελευθερώσετε το έμβολο.
4. Συμπιέστε το έμβολο στα 35 cc και περιμένετε μέχρι να μειωθεί η θερμοκρασία όπως πριν.
5. Επαναλάβετε για 30 cc και 25 cc.
6. Σταματήστε την εγγραφή δεδομένων.

### Επεξεργασία μετρήσεων

1. Μελετώντας το διάγραμμα πίεσης-όγκου, δοκιμάστε διάφορα “QuickCalcs” στον άξονα του όγκου (Volume axis) για να δείτε ποιο δίνει ευθεία γραμμή. Στην συνέχεια, κάντε μια γραμμική προσαρμογή καμπύλης (linear curve-fit) για να δείτε πόσο καλά ταιριάζει.
2. Πώς σχετίζονται η απόλυτη πίεση και ο όγκος σύμφωνα με τα αποτελέσματά σας; Υπό ποιες προϋποθέσεις ισχύει αυτή η σχέση;

3. Ποιες φυσικές ποσότητες συνθέτουν την κλίση της ευθείας γραμμής στο διάγραμμα;



4. Χρησιμοποιήστε την τιμή της κλίσης για να προσδιορίσετε τον αριθμό γραμμομορίων (n) αέρα στην σύριγγα. Δώστε προσοχή στις μονάδες!

5. Κοιτάξτε προσεκτικά το διάγραμμα απόλυτης πίεσης–όγκου. Γιατί υπάρχει μετατόπιση στον άξονα στον όγκο; Που οφείλεται αυτός ο επιπλέον όγκος;

## Μέρος Τρίτο – Σταθερός Όγκος

### Ρυθμίσεις

Η συσκευή απολύτου μηδενός αποτελείται από μια άδεια σφαίρα που λειτουργεί σαν δοχείο σταθερού όγκου καθώς η συσκευή τοποθετείται σε λουτρό με νερό σε διάφορες θερμοκρασίες. Συνδέστε το βύσμα (jack) στην θύρα θερμοκρασίας για να μετρήσετε την θερμοκρασία χρησιμοποιώντας το θερμίστορ που είναι ενσωματωμένο στο τοίχωμα της σφαίρας. Συνδέστε τον ταχυσύνδεσμο στην θύρα πίεσης για να μετρήσετε την πίεση μέσα στη σφαίρα.

Θα χρειαστείτε μια πηγή ζεστού νερού και μια πηγή κρύου νερού (ή πάγου).

Βαθμονόμηση αισθητήρα πίεσης: Μπορεί να είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση του αισθητήρα απόλυτης πίεσης. Ο αισθητήρας θα πρέπει να μετράει 101 kPa όταν τον εξισώνετε με την ατμοσφαιρική πίεση. Εάν δεν μετράει την σωστή τιμή, ανοίξτε το εργαλείο βαθμονόμησης (Calibration tool) στα αριστερά της οθόνης και βαθμονομήστε την πίεση χρησιμοποιώντας το "One Standard (1 point offset)"

### Εκτέλεση

1. Ρυθμίστε τον ρυθμό σάρωσης ('sample rate') στα 10 Hz. Δημιουργήστε στο λογισμικό μία γραφική παράσταση Θερμοκρασίας (°C) – Απόλυτης Πίεσης. Δημιουργήστε έναν πίνακα Θερμοκρασία και Απόλυτη Πίεση. Επιλέξτε χειροκίνητη δειγματοληψία ('Manual sampling' στο Setup Menu).
2. Γεμίστε ένα από τα πλαστικά δοχεία με αρκετό ζεστό νερό για να καλύψετε την σφαίρα (Σχήμα 4). Γεμίστε ένα άλλο δοχείο με πάγο και νερό. Γεμίστε το τρίτο δοχείο με νερό σε θερμοκρασία δωματίου. Βυθίστε εντελώς την σφαίρα στο ζεστό νερό. Βεβαιωθείτε ότι ο λευκός ταχυσύνδεσμος πίεσης είναι συνδεδεμένος στον αισθητήρα αφού τοποθετήσετε την σφαίρα στο ζεστό νερό, έτσι ώστε ο αριθμός γραμμομορίων αερίου να έχει ρυθμιστεί ενώ βρίσκεται στο ζεστό νερό.

3. Ξεκινήστε την εγγραφή δεδομένων. Βυθίστε εντελώς την σφαίρα και περιμένετε να σταθεροποιηθούν η πίεση και η θερμοκρασία. Κάντε κλικ στο πλήκτρο “Keep” για να αποθηκεύσετε αυτό το ζεύγος δεδομένων.
4. Βάλτε την σφαίρα στο παγωμένο νερό και βυθίστε την πλήρως. Μην συνδέσετε ξανά τον ταχυσύνδεσμο. Περιμένετε να επέλθει ισορροπία και στην συνέχεια κάντε κλικ στο πλήκτρο “Keep”.
5. Βάλτε την σφαίρα στο νερό θερμοκρασίας δωματίου. Ανακατέψτε το νερό για να πάρετε μια ομοιόμορφη θερμοκρασία και κάντε κλικ στο πλήκτρο “Keep” όταν η πίεση και η θερμοκρασία σταθεροποιηθούν.
6. Πατήστε το πλήκτρο “Stop”.
7. Ξεκινήστε μια νέα μέτρηση και βάλτε την σφαίρα στο παγωμένο νερό και εξισώστε την πίεση αποσυνδέοντας και στην συνέχεια επανασυνδέοντας τον ταχυσύνδεσμο, ενώ η σφαίρα βρίσκεται στο παγωμένο νερό. Αυτό κάνει την σφαίρα να έχει διαφορετική ποσότητα αερίου μέσα της. Μόλις σταθεροποιηθεί η πίεση και η θερμοκρασία, πατήστε “Keep”.
8. Βάλτε την σφαίρα στο νερό θερμοκρασίας δωματίου και πατήστε το “Keep” μόλις σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία.
9. Τέλος, βάλτε την σφαίρα στο ζεστό νερό, περιμένετε να σταθεροποιηθούν οι ενδείξεις και στην συνέχεια, πατήστε το πλήκτρο “Keep”. Μετά πατήστε “Stop”.
10. Επαναλάβετε αυτήν την διαδικασία, εξισώνοντας πρώτα την πίεση στο λουτρό θερμοκρασίας δωματίου, μετά πηγαίνετε στο λουτρό πάγου και μετά πηγαίνετε στο λουτρό ζεστού νερού.

## Επεξεργασία μετρήσεων

### Προσδιορισμός του απολύτου μηδενός

Εξ ορισμού, η πίεση ενός αερίου είναι μηδέν στο απόλυτο μηδέν. Βρείτε την θερμοκρασία στην οποία  $P = 0$  για κάθε εκτέλεση. Θα πρέπει να ταιριάζετε μια ευθεία γραμμή σε κάθε εκτέλεση για να το κάνετε αυτό.

	▶ Set	✕ Set
	Run	Absolute Zero (°C)
1	Ice Water First	-270.6
2	Hot Water First	-270.9
3	Room Temp First	-272.0
4		
5		
Mean	--	-271.2
Std. Dev.	--	0.7

1. Με την χρήση παχυμέτρου, μετρήσετε την διάμετρο της σφαίρας και να υπολογίσετε τον όγκο της. Είναι αυτή η μέτρηση μικρότερη ή μεγαλύτερη από τον πραγματικό όγκο της σφαίρας; Γιατί;

2. Χρησιμοποιήστε τον καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου για να δείξετε ότι ένα διάγραμμα θερμοκρασίας έναντι πίεσης οδηγεί σε ευθεία γραμμή με κλίση που δίνεται από:

$$\text{κλίση} = \frac{V}{nR}$$

3. Προσδιορίστε την κλίση αυτής της γραμμής από το διάγραμμα θερμοκρασίας–πίεσης για μία από τις εκτελέσεις σας. Χρησιμοποιήστε τις τιμές σας για να προσδιορίσετε τον αριθμό γραμμομορίων (n) αέρα στη σφαίρα. Δώστε προσοχή στις μονάδες!

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

Γράψτε μια περίληψη των αποτελεσμάτων σας. Ποια είναι τα γενικά συμπεράσματα που μπορείτε να εξάγετε από τα αποτελέσματά σας; Για παράδειγμα, πώς αλλάζει η πίεση ενός αερίου όταν ο όγκος μειώνεται σε σταθερή θερμοκρασία;

Δώστε την αριθμητική τιμή του απολύτου μηδενός που προσδιορίσατε, συμπεριλαμβανομένης της αβεβαιότητας, της αποδεκτής τιμής και της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ τους. Ήταν η τιμή που βρήκατε χαμηλότερη ή υψηλότερη από την αποδεκτή τιμή; Η αποδεκτή τιμή εμπίπτει στα όρια της αβεβαιότητας της μέτρησής σας; Γιατί ή γιατί όχι;

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί ο λόγος των θερμοχωρητικοτήτων δια μέσου της περιόδου της ταλαντευόμενης πίεσης.

### Περιγραφή

Ένας κύλινδρος γεμίζεται με αέρα και είναι συνδεδεμένος με έναν αισθητήρα πίεσης. Το έμβολο ωθείται με το χέρι και αφήνεται να ταλαντευτεί. Η ταλαντευόμενη πίεση καταγράφεται ως συνάρτηση του χρόνου και προσδιορίζεται η περίοδος. Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων υπολογίζεται με βάση την περίοδο της ταλάντωσης, σύμφωνα με τη μέθοδο του Ruchhardt.

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Στη μέθοδο του Ruchhardt, ένας κύλινδρος αερίου συμπιέζεται αδιαβατικά με την βοήθεια ενός εμβόλου. Το έμβολο θα ταλαντευτεί στη συνέχεια γύρω από την θέση ισορροπίας. Ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων,  $\gamma$ , μπορεί να προσδιοριστεί μετρώντας την περίοδο της ταλάντωσης.

Εάν το έμβολο μετατοπιστεί προς τα κάτω σε απόσταση  $x$ , θα υπάρξει μια δύναμη αποκατάστασης που αναγκάζει το έμβολο να επιστρέψει πίσω προς την θέση ισορροπίας (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Το έμβολο ωθείται με το χέρι.

Ακριβώς όπως μια μάζα σε ένα ελατήριο, το έμβολο θα ταλαντευτεί. Το έμβολο λειτουργεί ως μάζα και ο αέρας λειτουργεί ως ελατήριο. Η περίοδος ταλάντωσης μάζας σε ελατήριο (ή για το έμβολο - αέρα) είναι:

$$T = 2\pi\sqrt{m/k} \quad (1)$$

Για να προσδιορίσετε τη σταθερά ελατηρίου,  $k$ , για τον αέρα, υπολογίστε τη δύναμη όταν το έμβολο μετατοπίζεται σε απόσταση  $x$ . Όταν το έμβολο μετατοπίζεται προς τα κάτω σε απόσταση  $x$ , ο όγκος μειώνεται κατά πολύ λίγο σε σύγκριση με τον συνολικό όγκο:  $dV = x \cdot A$  όπου το  $A$  είναι η διατομή του εμβόλου.

Η προκύπτουσα δύναμη στο έμβολο είναι  $F = A \cdot dP$  όπου  $dP$  είναι η μικρή αλλαγή στην πίεση. Για να βρούμε μια σχέση μεταξύ  $dP$  και  $dV$ , υποθέτουμε ότι εάν οι ταλαντώσεις είναι μικρές και γρήγορες, δεν λαμβάνεται ούτε χάνεται θερμότητα από το αέριο. Έτσι, η διαδικασία είναι αδιαβατική. Άρα :

$$PV^\gamma = \text{σταθερά} \quad (2)$$

Όπου ο λόγος των γραμμομοριακών θερμοχωρητικότητων είναι:

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \quad (3)$$

Για ένα διατομικό αέριο  $C_V = 5/2 R$  and  $C_P = 7/2 R$ , οπότε  $\gamma = 7/5$ .

Λαμβάνοντας την παράγωγο της Εξίσωσης (2) παίρνουμε:

$$\gamma PV^{\gamma-1} dV + V^\gamma dP = 0 \quad (4)$$

Αν επιλύσουμε ως προς  $dP$ , προκύπτει:

$$dP = -\frac{\gamma PV^{\gamma-1}}{V^\gamma} dV \quad (5)$$

Εφόσον  $dV = x \cdot A$ ,

$$dP = -\frac{\gamma P x A}{V} \quad (6)$$

Βάζοντας μέσα στην  $F = A \cdot dP$  έχουμε:

$$F = -\left(\frac{\gamma P A^2}{V}\right) x \quad (7)$$

Συγκρίνοντας αυτό με  $F = -k \cdot x$ :

$$k = \left(\frac{\gamma P A^2}{V}\right) \quad (8)$$

Η αντικατάσταση στην εξίσωση της περιόδου για το  $k$  δίνει:

$$T = 2\pi \sqrt{mV/\gamma P A^2} \quad (9)$$

Η επίλυση ως προς τον όγκο δίνει:

$$V = \frac{\gamma A^2 P T^2}{4\pi^2 m} \quad (10)$$

Ο συνολικός όγκος είναι  $A(h+h_0)$ , όπου  $h$  είναι το ύψος που μετράτε στην χαραγμένη κλίμακα και  $h_0$  είναι το άγνωστο ύψος κάτω από το μηδέν της κλίμακας. Η αντικατάσταση του όγκου και η επίλυση ως προς το ύψος του εμβόλου,  $h$ , μας δίνει:

$$h = \left( \frac{\gamma AP}{4\pi^2 m} \right) T^2 - h_0 \quad (11)$$

Έτσι, εάν το ύψος του εμβόλου σχεδιαστεί σε σχέση με το τετράγωνο της περιόδου, το γράφημα που προκύπτει θα είναι μια ευθεία γραμμή με:

$$\text{κλίση} = \left( \frac{\gamma AP}{4\pi^2 m} \right) \quad (12)$$

και κόβει τον  $\gamma$ -άξονα στο  $h_0$ . Λύνοντας την Εξίσωση (12) ως προς τον λόγο των ειδικών θερμοτήτων μας δίνει:

$$\gamma = \frac{4\pi^2 m (\text{κλίση})}{AP} \quad (13)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του εμβόλου,  $A$  είναι η διατομή του εμβόλου,  $P$  είναι ατμοσφαιρική πίεση και η κλίση είναι από το γράφημα του  $h$  έναντι  $T^2$ .

## Εκτέλεση της άσκησης

1. Τοποθετήστε την συσκευή Θερμικού Κινητήρα/Νόμο Αερίων πάνω στην βάση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.
2. Συνδέστε έναν διπλό αισθητήρα πίεσης σε μία από τις θύρες στην συσκευή. Ξεβιδώστε και τους δύο σφικκτήρες των σωλήνων στο κάτω μέρος της συσκευής.
3. Σηκώστε το έμβολο στο σημάδι των 9 cm και σφίξτε το σε αυτήν τη θέση με τη πλαϊνή βίδα χειρός στο πάνω μέρος του κυλίνδρου. Κλείστε τον σφικκτήρα του σωλήνα στην ανοιχτή θύρα. Χαλαρώστε τη πλαϊνή βίδα χειρός και τώρα το έμβολο θα παραμείνει στα 9 cm.
4. Συνδέστε τον διπλό αισθητήρα πίεσης στο κανάλι A στην διεπαφή 850.

## Συλλογή Δεδομένων

1. Βρείτε τη μάζα ( $m$ ) του εμβόλου (που δίνεται στην ετικέτα της συσκευής) και την διατομή ( $A$ ) του εμβόλου (η διάμετρος του εμβόλου δίνεται στην ετικέτα της συσκευής)
2. Κάντε κλικ στο εικονίδιο "Record".

3. Χρησιμοποιώντας την άκρη του δακτύλου σας, χτυπήστε ελαφρά και στιγμιαία προς τα κάτω το έμβολο. Κάντε κλικ στο εικονίδιο “Stop”.
4. Πηγαίνετε στην καρτέλα “Analysis” και χρησιμοποιείστε το εργαλείο συντεταγμένων για να προσδιορίσετε την περίοδο της ταλάντωσης από το γράφημα πίεσης–χρόνου. Αναπτύξτε την περιοχή του γραφήματος που δείχνει την ταλάντωση. Μετρήστε την περίοδο μετρώντας το χρόνο για μερικές κορυφές και διαιρώντας με τον αριθμό των κορυφών. Πληκτρολογήστε αυτήν την περίοδο και το αντίστοιχο ύψος εμβόλου στον πίνακα.
5. Ανοίξτε το σφιγκτήρα του σωλήνα στην ανοιχτή θύρα. Χαμηλώστε το έμβολο στο σημάδι των 8 cm και στερεώστε το σε αυτή τη θέση με την πλευρική βίδα χειρός στο επάνω μέρος του κυλίνδρου. Κλείστε το σφιγκτήρα του σωλήνα στην ανοιχτή θύρα. Χαλαρώστε την πλαϊνή βίδα χειρός και τώρα το έμβολο θα παραμείνει στα 8 cm. Επαναλάβετε τη διαδικασία.
6. Στη συνέχεια, συνεχίστε να κατεβάζετε το έμβολο με βήμα 1 cm, επαναλαμβάνοντας τη διαδικασία σε κάθε θέση του εμβόλου έως ελάχιστο ύψος ενός εκατοστού.

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Χρησιμοποιήστε το εργαλείο συντεταγμένων για να προσδιορίσετε την περίοδο της ταλάντωσης από το γράφημα πίεσης–χρόνου. Αναπτύξτε την περιοχή του γραφήματος που δείχνει την ταλάντωση. Μετρήστε την περίοδο μετρώντας το χρόνο για μερικές κορυφές και διαιρώντας με τον αριθμό των κορυφών. Πληκτρολογήστε αυτήν την περίοδο και το αντίστοιχο ύψος εμβόλου στον πίνακα.
2. Εάν δεν υπάρχει βαρόμετρο, υποθέστε ότι η ατμοσφαιρική πίεση είναι  $1.01 \times 10^5$  Pa. Χρησιμοποιώντας την κλίση του προκύπτοντος γραφήματος  $h$  έναντι  $T^2$ , υπολογίστε την τιμή του  $\gamma$  για τον αέρα και να την συγκρίνετε με την ιδανική τιμή.

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Ποιος είναι ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων ενός διατομικού αερίου θεωρητικά; Γιατί;
2. Ποια είναι ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων ενός μονοατομικού αερίου θεωρητικά; Γιατί;
3. Θα ήταν η κλίση του γραφήματος για το ήλιο μεγαλύτερη ή μικρότερη από την κλίση για τον αέρα; Γιατί;
4. Γιατί μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο αέρας είναι διατομικό αέριο; Ποια είναι τα κύρια συστατικά του αέρα;

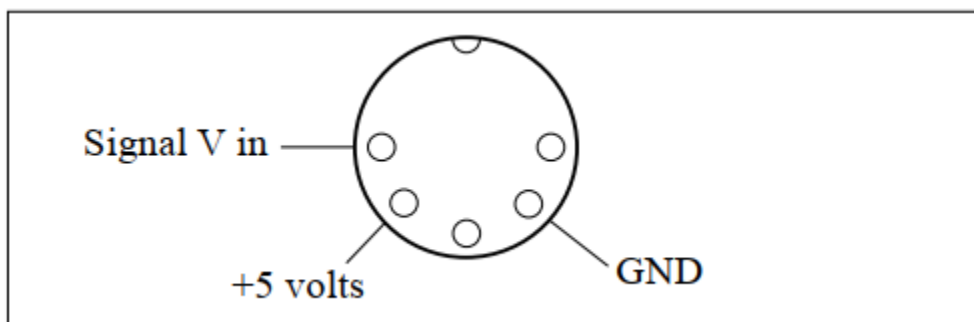


### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί ο λόγος των ειδικών θερμοτήτων,  $\gamma$ , αερίων εκτελώντας αδιαβατική συμπίεση.

### Περιγραφή

Θα χρησιμοποιήσουμε διάταξη αδιαβατικών μεταβολών αερίου που επιτρέπει την μελέτη αδιαβατικών και ισοθερμικών συμπίεσεων και εκτονώσεων αερίου. Ενσωματωμένοι ευαίσθητοι μεταλλάκτες (δηλ. αισθητήρες) μετρούν την πίεση, την θερμοκρασία και τον όγκο του αερίου και παρέχουν αναλογικό σήμα σε μορφή ηλεκτρικής τάσης. Το σήμα μεταφέρεται σε τρεις εισόδους της συσκευής PASCO 850 Universal Interface και από εκεί μπορεί να απεικονιστεί γραφικά και να καταγραφεί στο λογισμικό Capstone, συνθέτοντας έτσι έναν παλμογράφο. Η σύνδεση των μεταλλακτών με την συσκευή PASCO 850 γίνεται με καλώδια που στο ένα άκρο έχουν βύσμα τύπου jack 3.5 mm και στο άλλο άκρο βύσμα με 5 ακίδες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Βύσμα με 5 ακίδες για την σύνδεση των μεταλλακτών στην συσκευή PASCO 850.

Στην συνέχεια ο χρήστης με κατάλληλες εξισώσεις, μπορεί να μετατρέψει το ηλεκτρικό σήμα σε φυσικό μέγεθος (πίεση, θερμοκρασία και όγκο) και να προχωρήσει σε περαιτέρω μελέτη των μεταβολών ενός αερίου. Η πειραματική διάταξη διαθέτει έναν μοχλό ο οποίος επιτρέπει την γρήγορη κίνηση του εμβόλου, εκτελώντας κατά αυτόν τον τρόπο αδιαβατική μεταβολή (Σχήμα 2).

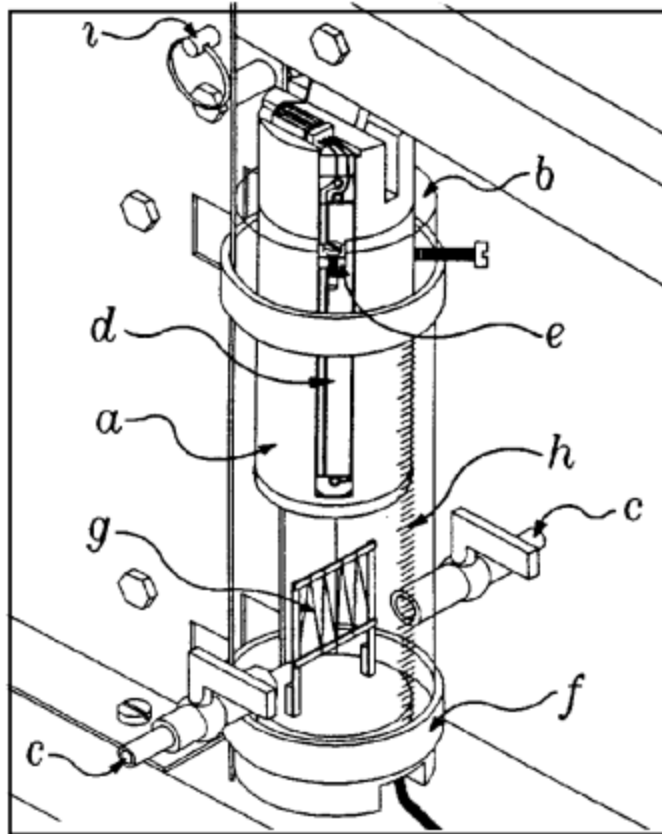


Σχήμα 2. Διάταξη αδιαβατικών μεταβολών αερίου.

Η διάταξη αδιαβατικών μεταβολών αερίου επιτρέπει την εκτέλεση διάφορων αναλύσεων:

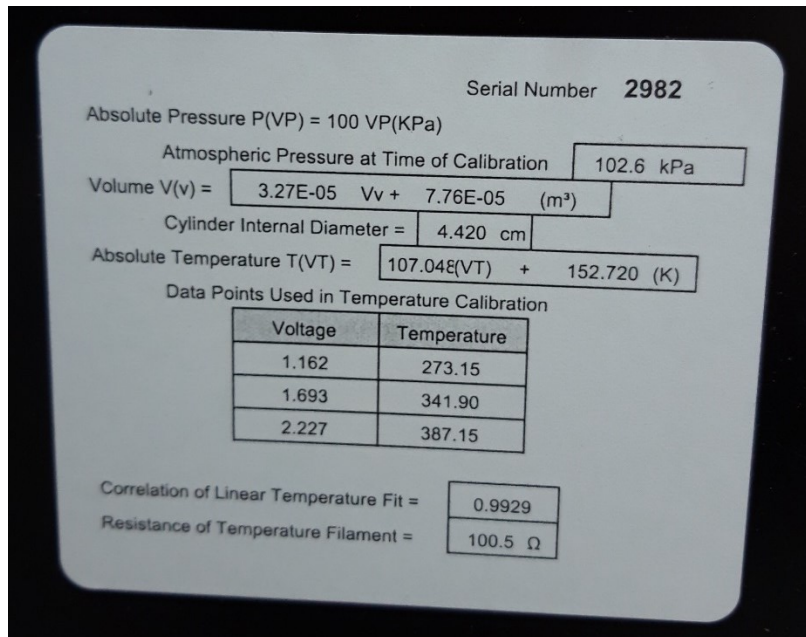
- Μέτρηση του λόγου θερμοχωρητικότητας  $\gamma = C_p / C_v$
- Σύγκριση του λόγου θερμοχωρητικότητας μονοατομικού, διατομικού και πολυατομικού αερίου.
- Σύγκριση ισοθερμικής και αδιαβατικής συμπίεσης ή εκτόνωσης.
- Σύγκριση τελικής πίεσης και θερμοκρασίας με την θεωρητική τιμή που προβλέπει η καταστατική εξίσωση ιδανικού αερίου.
- Μέτρηση του έργου που δαπανήθηκε στο αέριο κατά την διάρκεια μιας αδιαβατικής συμπίεσης και σύγκρισή του με την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας, αλλά και με το θεωρητικά υπολογισμένο έργο.

Στο Σχήμα 3 φαίνεται το έμβολο της διάταξης με λεπτομέρεια. Το έμβολο είναι φτιαγμένο από λευκό πλαστικό και παλινδρομεί μέσα σε έναν διάφανο και πλαστικό κύλινδρο (b) ο οποίος μπορεί να γεμιστεί με οποιοδήποτε αέριο μέσω δύο μπρούτζινων βανών (c). Στην παράπλευρη επιφάνεια του εμβόλου είναι ενσωματωμένος ένας γραμμικός διαιρέτης τάσης (ποντεσιόμετρο) (d) που δείχνει την θέση του εμβόλου. Μια πηγή 5 V συνδέεται στο ποντεσιόμετρο στην αντίστοιχη υποδοχή που υπάρχει στην διάταξη για τα 5 V. Η πλαστική βάση (f) που σφραγίζει το κάτω μέρος του κυλίνδρου έχει ενσωματωμένους δύο μεταλλάκτες. Ο ένας είναι πιεζο-ηλεκτρικός μεταλλάκτης που μετράει πίεση και είναι μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος γέφυρας. Ο άλλος είναι αισθητήρας θερμοκρασίας (g) που αποτελείται από ένα πολύ ψιλό νήμα από νικέλιο το οποίο έχει πολύ υψηλό συντελεστή θερμικής αντίστασης. Το νήμα έχει επίσης μεγάλο λόγο επιφάνειας προς μάζα που επιτρέπει γρήγορες εναλλαγές της θερμοκρασίας του. Ωστόσο, ο αισθητήρας θερμοκρασίας είναι ο πιο αργός από τους τρεις μεταλλάκτες του πειράματος. Αυτό το νήμα αποτελεί επίσης έναν κλάδο του κυκλώματος γέφυρας. Οι έξοδοι του ηλεκτρονικού κυκλώματος είναι αναλογική τάση ανάλογη της πίεσης και της θερμοκρασίας. Το κύκλωμα τροφοδοτείται από εξωτερική τάση 9-10 V.



Σχήμα 3. Το έμβολο της πειραματικής διάταξης.

Υπάρχει επίσης μία ταινία με υποδιαίρέσεις (h) κολλημένη στον κύλινδρο ώστε να μπορεί να βρεθεί απευθείας η θέση του εμβόλου με το μάτι. Υπάρχουν και δύο πείροι (i) που χρησιμοποιούνται σε περίπτωση που θέλουμε να περιορίσουμε την διαδρομή του εμβόλου. Υπάρχουν ακόμα δύο υποδοχές για να μπαίνουν αυτοί οι πείροι όταν δεν χρησιμοποιούνται. Τέλος, πάνω στην διάταξη είναι κολλημένη μία ετικέτα (Σχήμα 4) με πληροφορίες που χρειάζονται κατά την μετατροπή των ηλεκτρικών σημάτων σε φυσικά μεγέθη στο λογισμικό Capstone.



Σχήμα 4. Ετικέτα με πληροφορίες χρήσιμες για την μετατροπή των σημάτων.

Για την πίεση: Ο μεταλλάκτης πίεσης είναι βαθμονομημένος από τον κατασκευαστή. Η τάση εξόδου είναι 1.00 V για κάθε 100 kPa απόλυτης πίεσης.

Για την θερμοκρασία: Ο μεταλλάκτης θερμοκρασίας έχει επίσης βαθμονομηθεί από τον κατασκευαστή. Η εξίσωση που παρέχεται στην ετικέτα υποθέτει ότι ο μεταλλάκτης λειτουργεί γραμμικά. Παρέχονται επίσης τρία σημεία βαθμονόμησης για βελτίωση των μετρήσεων κάνοντας γραμμική προσαρμογή ανάμεσα από αυτά τα σημεία (προαιρετικό).

Για τον όγκο: Η εσωτερική διάμετρος του κυλίνδρου δίνεται στην ετικέτα. Οι δύο βάνες προσθέτουν όγκο στο αέριο ο οποίος είναι 1 cm<sup>3</sup> (ή 0.06 cm στην θέση του εμβόλου).

## Θεωρητικό υπόβαθρο

Μια μεταβολή που συμβαίνει χωρίς την ανταλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον ονομάζεται αδιαβατική. Αυτή η μεταβολή μπορεί να συμβεί αν το σύστημα είναι μονωμένο, αλλά στην πράξη αν η μεταβολή γίνει πολύ γρήγορα (ώστε να μην υπάρχει χρόνος να γίνει ανταλλαγή θερμότητας) η μεταβολή και πάλι θεωρείται αδιαβατική. Παρακάτω δίνονται εξισώσεις που καταλήγουν στην συσχέτιση P-V ή P-T για μια αδιαβατική μεταβολή σταθερής ποσότητας αερίου (σταθερός αριθμός γραμμομορίων, n).

Ο 1<sup>ος</sup> Νόμος της Θερμοδυναμικής για μια αδιαβατική μεταβολή μπορεί να γραφεί ως:

$$dQ = n \cdot C_v \cdot dT + p \cdot dV = 0 \quad (1)$$

όπου  $C_v$  είναι η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο,  $T$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία και  $n$  είναι ο αριθμός των mol και  $V$  είναι ο όγκος. Για ένα ιδανικό αέριο  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ . Επομένως:

$$P \cdot dV + V \cdot dP = n \cdot R \cdot dT \quad (2)$$

Λύνοντας ως προς  $dT$  παίρνουμε:

$$dT = \frac{P \cdot dV}{n \cdot R} + \frac{V \cdot dP}{n \cdot R} \quad (3)$$

Εισάγοντας την Εξ. 3 στην Εξ. 1 παίρνουμε:

$$dQ = n \cdot C_v \cdot \left( \frac{P \cdot dV}{n \cdot R} + \frac{V \cdot dP}{n \cdot R} \right) + P \cdot dV = 0 \Rightarrow \quad (4)$$

$$\Rightarrow (C_v + R) \cdot P \cdot dV + C_v \cdot V \cdot dP \Rightarrow \quad (5)$$

$$\Rightarrow C_p \cdot P \cdot dV + C_v \cdot V \cdot dP \quad (6)$$

όπου  $C_p$  είναι η γραμμομοριακή ειδική θερμότητα υπό σταθερή πίεση. Η  $C_p$  σχετίζεται με την  $C_v$  μέσω της σχέσης  $C_p - C_v = R$ . Ο λόγος  $C_p$  προς  $C_v$  συμβολίζεται με  $\gamma$ . Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω αποτελέσματα παίρνουμε:

$$\frac{C_p \cdot P \cdot dV}{C_v \cdot P \cdot V} + \frac{dP}{P} = 0 \Rightarrow \quad (7)$$

$$\Rightarrow \gamma \cdot \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0 \Rightarrow \quad (8)$$

$$\Rightarrow \gamma \cdot \ln V + \ln P = \text{σταθερά} \Rightarrow \quad (9)$$

$$\Rightarrow P \cdot V^\gamma = \text{σταθερά} \Rightarrow \quad (10)$$

$$\Rightarrow P_1 \cdot V_1^\gamma = P_2 \cdot V_2^\gamma \quad (11)$$

Αυτή η συσχέτιση της αρχικής πίεσης και του αρχικού όγκου με την τελική πίεση και τον τελικό όγκο είναι η συνήθης μορφή του νόμου της αδιαβατικής μεταβολής. Από την Εξ. 11 και την καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου, προκύπτει μια άλλη μορφή του νόμου της αδιαβατικής μεταβολής:

$$T_1 \cdot V_1^{(\gamma-1)} = T_2 \cdot V_2^{(\gamma-1)} \quad (12)$$

Μία ακόμα σχέση που εξετάζεται στο συγκεκριμένο πείραμα είναι μεταξύ του έργου στο αέριο με την πίεση και τον όγκο κατά την αδιαβατική συμπίεση. Από την Εξ. 10 έχουμε:

$$P \cdot V^\gamma = \text{σταθ} = P_1 \cdot V_1^\gamma \Rightarrow P = \frac{\text{σταθ}}{V^\gamma} \quad (13)$$


Το έργο που χρειάζεται για να συμπιεσθεί το αέριο δίνεται από το ολοκλήρωμα:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV = \sigma\tau\alpha\theta \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^\gamma} = \sigma\tau\alpha\theta \cdot \int_{V_1}^{V_2} \left[ \frac{V^{(1-\gamma)}}{1-\gamma} \right]_{V_1}^{V_2} = (P_1 \cdot V_1^\gamma) \cdot \left[ \frac{V^{(1-\gamma)}}{1-\gamma} \right]_{V_1}^{V_2} \Rightarrow \quad (14)$$

$$\Rightarrow W = \frac{(P_1 \cdot V_1^\gamma)}{1-\gamma} \cdot (V_2^{(1-\gamma)} - V_1^{(1-\gamma)}) \quad (15)$$

όπου  $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων ( $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ).

## Ρυθμίσεις

- Συνδέστε τα τρία καλώδια που έχουν το βύσμα jack.  
Το κανάλι A είναι για την πίεση.  
Το κανάλι B για την θερμοκρασία.  
Το κανάλι C για τον όγκο.
- Τοποθετήστε τους πείρους ώστε να περιορίσετε την διαδρομή του εμβόλου. Η μέγιστη διαδρομή του εμβόλου μπορεί να μην δώσει καλά αποτελέσματα.
- Ανοίξτε ένα καινούριο αρχείο Capstone. Από το πάνω δεξί μέρος της οθόνης σύρετε το εικονίδιο του γραφήματος μέχρι το κέντρο της οθόνης. Πατήστε δύο φορές το εικονίδιο  (add new plot area to the graph display) για να δημιουργήσετε ακόμα δυο διαγράμματα. Στον γ-άξονα τα διαγράμματα θα πρέπει να γράφουν κατά σειρά: Channel A, Channel B και Channel C. Ο x-άξονας θα πρέπει να είναι ο χρόνος.
- Ξεκινήστε την εγγραφή.
- Κουνήστε τον μοχλό της διάταξης πάνω κάτω ώστε να βεβαιωθείτε ότι και οι τρεις μεταλλάκτες παρέχουν σήμα (σε mV). Αν κάποια από τις τρεις καμπύλες δεν φαίνεται να αλλάζει καθώς κουνάτε τον μοχλό, δοκιμάστε να αλλάξετε την κλίμακα του αντίστοιχου γ-άξονα. Σταματήστε την εγγραφή. Πατήστε “Delete Last Run”.
- Ανοίξτε την αριθμομηχανή. Δημιουργήστε τα τρία φυσικά μεγέθη με βάση τις εξισώσεις που αναγράφονται στην ετικέτα. Για να εμφανιστεί το μέγεθος π.χ. “Voltage, Ch A” πατήστε στο πληκτρολόγιο το πλήκτρο “[“. Οι εξισώσεις σας θα πρέπει να έχουν την μορφή του Σχήματος 5:

Calculations		Units
1	Pressure= 100*[Voltage, Ch A (V)]	kPa
2	Temperature= [redacted]*[Voltage, Ch B (V)]+[redacted]	K
3	Volume= [redacted]*[Voltage, Ch C (V)]+[redacted]	m <sup>3</sup>
4		

Σχήμα 5. Μορφή εξισώσεων για την δημιουργία των τριών φυσικών μεγεθών.

7. Πηγαίνετε στα διαγράμματα και αλλάξτε τους γ-άξονες σε Pressure, Temperature και Volume.
8. Ξεκινήστε την εγγραφή και επιβεβαιώστε ότι η πίεση, η θερμοκρασία και ο όγκος που φαίνονται στα διαγράμματα είναι σωστά. Σταματήστε την εγγραφή. Αν δεν είναι σωστά, τροποποιήστε τις εξισώσεις κατάλληλα.
9. Δημιουργήστε μια νέα καρτέλα και σε αυτήν δημιουργήστε ένα καινούριο διάγραμμα. Αυτό θα είναι το διάγραμμα P-V.

### Εκτέλεση της άσκησης

1. Ανοίξτε την μία βάνα και ανεβάστε τον μοχλό στο ανώτερο σημείο του. Κλείστε την βάνα. Ξεκινήστε μια εγγραφή.
2. Τραβήξτε απότομα προς τα κάτω τον μοχλό ώστε να επιτύχετε μια αδιαβατική συμπίεση.
3. Περιμένετε σε αυτήν την θέση έως ότου επέλθει ισορροπία.
4. Ένας άλλος φοιτητής θα πρέπει να κρατήσει την βάση της διάταξης ώστε να μην σηκωθεί από το τραπέζι.
5. Τραβήξτε απότομα τον μοχλό προς τα επάνω ώστε να επιτύχετε μια αδιαβατική εκτόνωση.
6. Περιμένετε σε αυτήν την θέση έως ότου επέλθει ισορροπία.
7. Σταματήστε την εγγραφή.
8. Ονομάστε αυτήν την εκτέλεση "Air".

Καθώς συμπιέζετε το αέριο, μέρος από το έργο που εκτελείτε πηγαίνει στην υπερνίκηση τριβών από την τσιμούχα του εμβόλου. Το μέρος του κυλίνδρου που ζεσταίνεται λόγω των τριβών δεν έρχεται σε επαφή με το αέριο. Ωστόσο, κατά την εκτόνωση, το μέρος αυτό του κυλίνδρου έρχεται σε επαφή με το αέριο με

αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του αερίου. Για τον λόγο αυτόν, η εκτόνωση δεν δίνει τόσο καλά αποτελέσματα όσο η συμπίεση.

9. Γεμίστε τον κύλινδρο με ήλιο (He). Στην μία βάνα θα συνδέσετε την φιάλη με το ήλιο. Αυτή η βάνα θα είναι η είσοδος του καινούριου αερίου. Η άλλη βάνα λειτουργεί μόνο ως έξοδος για να αδειάζει το περιεχόμενο του κυλίνδρου. Θα πρέπει να γεμίσετε και να αδειάσετε τον κύλινδρο περίπου 9 φορές όταν αλλάζετε αέριο, ώστε να είναι βέβαιο ότι το παλιό αέριο έχει εκτοπιστεί τελείως από την διάταξη.
10. Επαναλάβετε τα βήματα 2-7 και ονομάστε αυτήν την εκτέλεση "He".
11. Αλλάξτε αέριο και γεμίστε με κάποιο πολυατομικό (π.χ. CO<sub>2</sub>). Επαναλάβετε τα βήματα 2-7 και ονομάστε αυτήν την εκτέλεση "CO<sub>2</sub>".

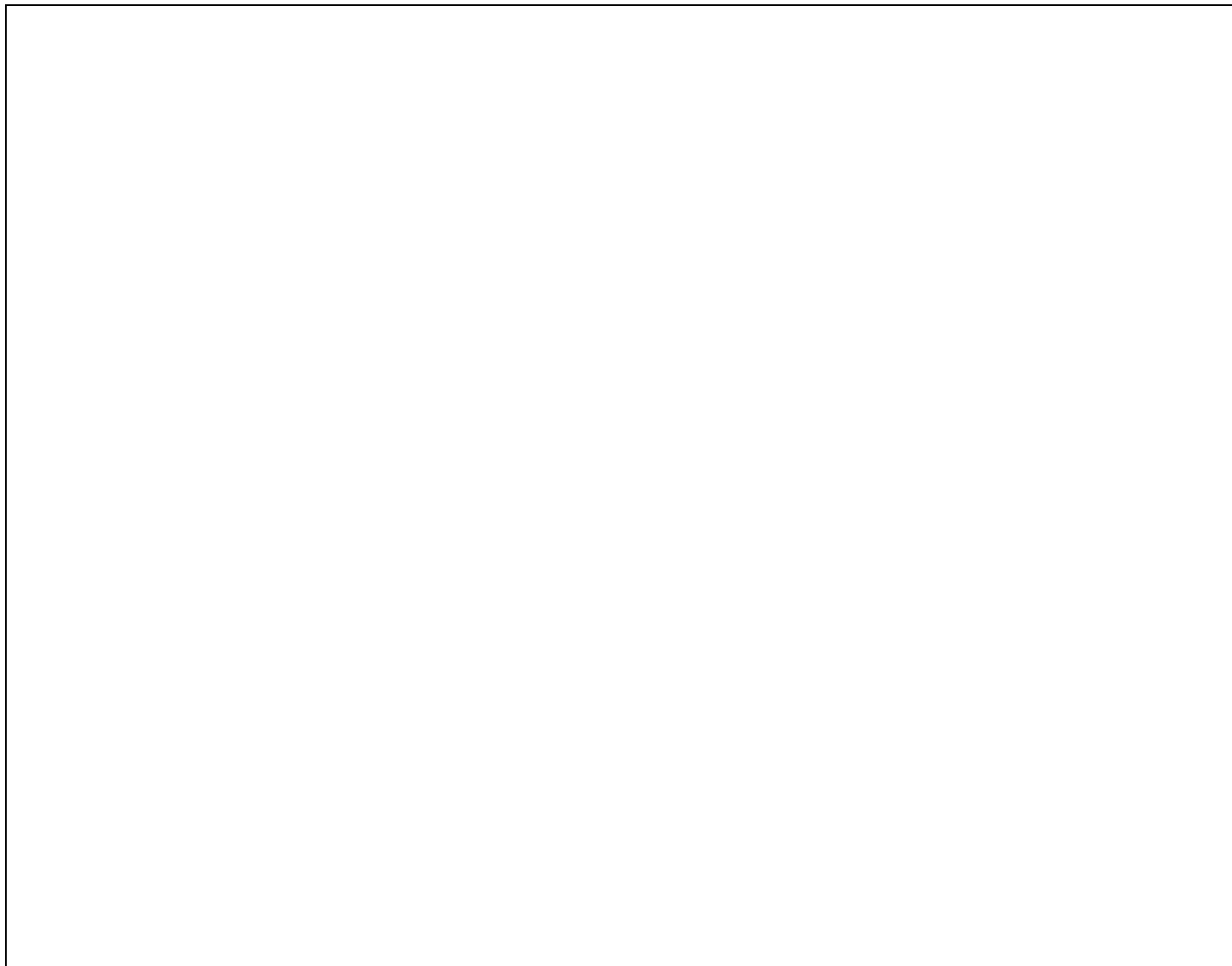
### Επεξεργασία μετρήσεων

1. Για κάθε αέριο, βρείτε την αρχική πίεση, θερμοκρασία και όγκο. Έπειτα, από τα διαγράμματα βρείτε την πίεση, την θερμοκρασία και τον όγκο στο τέλος της συμπίεσης. Χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις 11 και 12, βρείτε τον λόγο θερμοχωρητικότητας,  $\gamma$ .

2. Για κάθε αέριο, από το διάγραμμα P-V βρείτε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη που αφορά την συμπίεση ώστε να προσδιορίσετε το έργο στο αέριο. Έπειτα, από την Εξίσωση 15 χρησιμοποιώντας την αρχική πίεση,



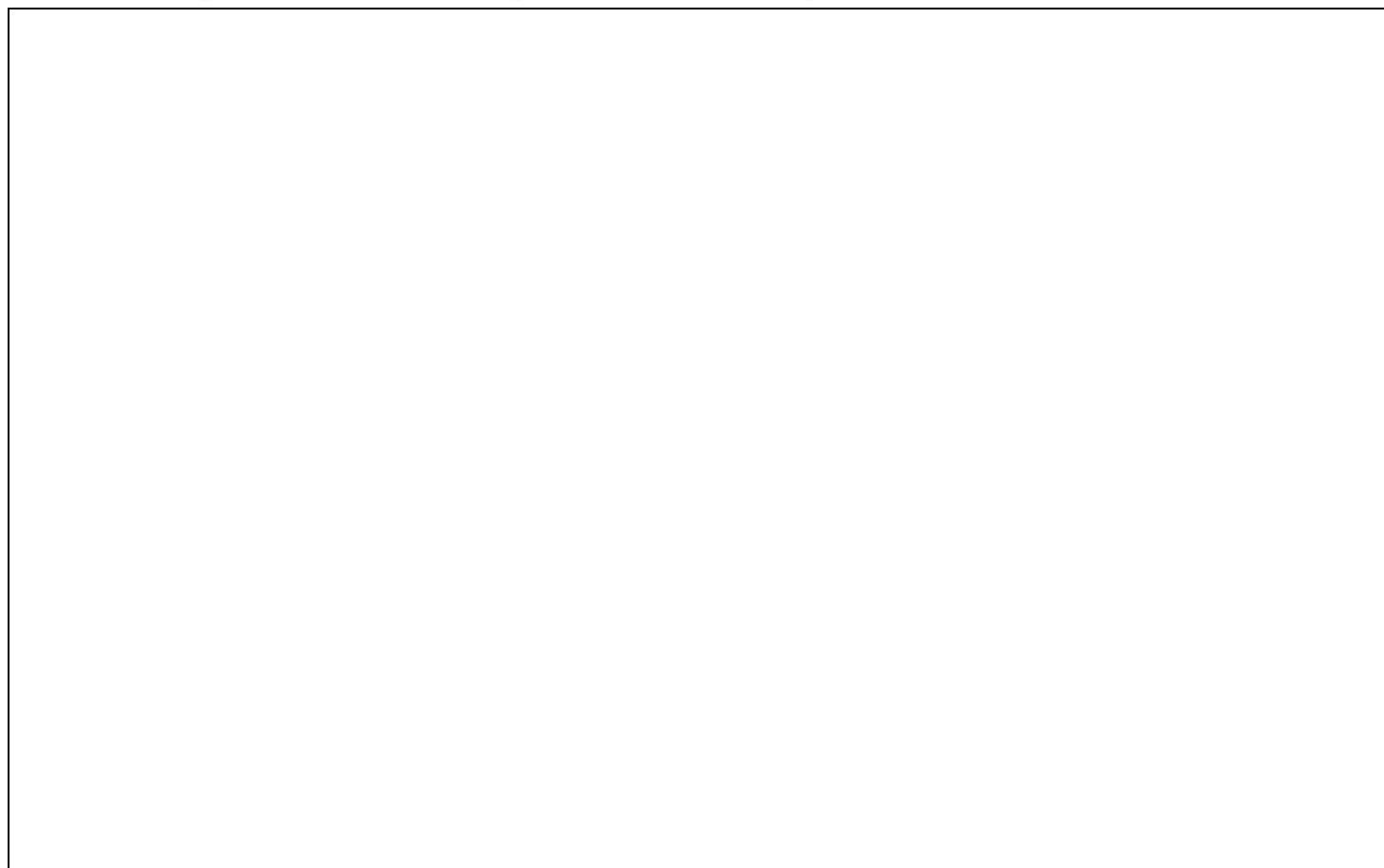
Θερμοκρασία και όγκο και τον τελικό όγκο από τις μετρήσεις σας, υπολογίστε το θεωρητικό έργο και συγκρίνετέ το με το πειραματικό (το εμβαδόν).



3. Για κάθε αέριο, από την αρχική πίεση, θερμοκρασία και όγκο και την καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου, βρείτε τον αριθμό των γραμμομορίων,  $n$ , που υπάρχουν μέσα στον κύλινδρο.



4. Για κάθε αέριο κατά την συμπίεση, υπολογίστε την μεταβολή της εσωτερικής ενέργειας από τα πειραματικά σας δεδομένα και συγκρίνετε την με το πειραματικό έργο. Είναι αυτά τα δύο μεγέθη ίσα; Γιατί ή γιατί όχι; Δίνονται:  $C_{v\_He} = 12.644 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  ,  $C_{v\_air} = 20.78 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$  ,  $C_{v\_CO2} = 28.075 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$



## Συμπεράσματα

1. Για ένα συγκεκριμένο αέριο, ο λόγος ειδικών θερμοτήτων που βρήκατε από την Εξίσωση 11 είναι ίδιος με εκείνον από την Εξίσωση 12; Γιατί ή γιατί όχι;

2. Ο λόγος ειδικών θερμοτήτων που βρήκατε πειραματικά για κάθε αέριο συμφωνεί με την πραγματική τιμή; Αν όχι, εξηγήστε γιατί.

3. Για κάθε αέριο, το έργο συμπίεσης διαφέρει από το έργο εκτόνωσης; Εξηγήστε.

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να υπολογιστεί το ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας, η λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου και η εντροπία ανάμειξης.

### Περιγραφή

Θα χρησιμοποιήσουμε θερμιδόμετρο το οποίο αποτελείται από δύο αλουμινένια δοχεία που το ένα φωλιάζει μέσα στο άλλο και ανάμεσά τους υπάρχει αέρας που παρέχει θερμομόνωση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Από το καπάκι του θερμιδομέτρου μπορούν να περάσουν ένα θερμόμετρο ή/και ένας ηλεκτρικός αντιστάτης.

Το εξωτερικό δοχείο λειτουργεί απλά σαν μόνωση και η μάζα του μας είναι αδιάφορη. Αντίθετα η μάζα του εσωτερικού δοχείου μπορεί να συναλλάξει θερμότητα με το περιεχόμενο οπότε πρέπει να είναι γνωστή.

Στην συγκεκριμένη άσκηση θα εκτελεστούν τρία πειράματα:

- A.** Ηλεκτρικό ισοδύναμο της θερμότητας. Αυτό το πείραμα εκτελείται μέσα από το αντίστοιχο αρχείο **Capstone**.
- B.** Λανθάνουσα θερμότητα τήξης του πάγου.
- Γ.** Εντροπία ανάμειξης θερμού και ψυχρού νερού.



Σχήμα 1. Το θερμιδόμετρο και τα εξαρτήματά του.

## Πείραμα Α

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Σκοπός αυτής της άσκησης είναι ο προσδιορισμός του ποσού ηλεκτρικής ενέργειας που ισοδυναμεί με συγκεκριμένο ποσό θερμικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται μετρώντας το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει ένας ηλεκτρικός αντιστάτης για να θερμάνει νερό και την αντίστοιχη θερμότητα που μετέφερε στο νερό. Επίσης, προσδιορίζεται η ισοδυναμία Joule με cal (θερμίδα).

Γενικά μιλώντας, όταν θερμότητα προστίθεται σε ένα στερεό ή υγρό, αυξάνεται η εσωτερική του ενέργεια και επομένως η θερμοκρασία του. Η σχέση μεταξύ θερμότητας και της αντίστοιχης μεταβολής στην θερμοκρασία δίνεται από:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

όπου  $Q$  = θερμότητα,  $m$  = μάζα,  $c$  = ειδική θερμότητα και  $\Delta T$  = μεταβολή στην θερμοκρασία.

Υπάρχουν δύο αντικείμενα που αλλάζουν θερμοκρασία σε αυτό το πείραμα. Το νερό και το εσωτερικό αλουμινένιο δοχείο του θερμιδόμετρου. Τα δύο αυτά έχουν διαφορετικές μάζες και ειδικές θερμότητες, αλλά θα υποθέσουμε ότι και τα δύο έχουν την ίδια μεταβολή στην θερμοκρασία.

Σε αυτό το πείραμα, θερμότητα προστίθεται στο θερμιδόμετρο με έναν ηλεκτρικό αντιστάτη.

Η ηλεκτρική ενέργεια από την πρίζα μετατρέπεται σε θερμότητα μέσα στον αντιστάτη, αυξάνοντας έτσι την θερμοκρασία του νερού και του δοχείου.

Η ηλεκτρική ισχύς καθορίζεται από την τάση που παρέχει η πρίζα και το προκαλούμενο ρεύμα.

$$P = I \cdot V \quad (2)$$

όπου  $I$  = ρεύμα που διατρέχει τον αντιστάτη (Amps),  $V$  = τάση στα άκρα του αντιστάτη (Volts) και  $P$  = ισχύς (Watts = Joules/sec).

Η ισχύς είναι ο ρυθμός παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας:  $\text{Ισχύς} = \text{Ενέργεια} / \text{Χρόνος}$ . Οπότε η ενέργεια μπορεί να υπολογιστεί από:

$$\text{Ενέργεια} = (\text{Ισχύς}) \cdot (\text{Χρόνος}) \quad (3)$$

ή στην περίπτωση που η ισχύς δεν είναι σταθερή, η ενέργεια ισούται με το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη Ισχύος-Χρόνου.

1. Το θερμιδόμετρο έχει δύο δοχεία, που χωρίζονται από έναν μονωτικό δακτύλιο (βλ. Σχήμα 1). Για ποιον λόγο υπάρχουν δύο δοχεία;

2. Ένα μόνο δοχείο χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς. Ποιο από τα δύο;

3. Ποιο από τα δύο υλικά χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για αυξήσει την θερμοκρασία του κατά έναν βαθμό Κελσίου αν έχουν την ίδια μάζα: το νερό ή το αλουμίνιο;

4. Υπάρχει κάτι άλλο που θερμαίνεται πέρα από το νερό και το δοχείο; Αν ναι, τι; Επηρεάζει αυτό τα αποτελέσματα;

5. Τι είναι το Watt-second?

## Ρυθμίσεις

1. Συνδέστε ένα θερμόμετρο με μεταλλικό στέλεχος μέσω bluetooth με το Capstone.

Σημαντικό: Βεβαιωθείτε ότι το μεταλλικό στέλεχος δεν ακουμπάει με τον αντιστάτη. Βλέπε Σχήμα 1.

2. Συνδέστε σε σειρά με τον αντιστάτη το αμπερόμετρο και παράλληλα με τα άκρα του το βολτόμετρο. Συνδέστε τα όργανα μέσω bluetooth με το Capstone.

3. Στην αριθμομηχανή, δημιουργήστε μια εξίσωση για την ισχύ σύμφωνα με την Εξίσωση 2.

Χρησιμοποιήστε το πλήκτρο "[" από το πληκτρολόγιο για να βρείτε το ρεύμα και την τάση από τα όργανα.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Μην έχετε σε λειτουργία τον αντιστάτη όταν αυτός βρίσκεται έξω από το νερό.

Μην πιάνετε τον αντιστάτη με τα χέρια σας. Μπορεί να είναι ζεστός και να καείτε.

Μην εφαρμόζετε πάνω από 10 V στον αντιστάτη. Θα καεί.



Σχήμα 2. Συσκευή καταγραφής.

### Εκτέλεση της άσκησης

1. Έχοντας το θερμόμετρο στο τραπέζι για ώρα, πατήστε "Record" για να πάρετε την θερμοκρασία δωματίου. Σταματήστε την εγγραφή.
2. Ζυγίστε το εσωτερικό αλουμινένιο δοχείο του θερμιδόμετρου. Καταγράψτε την μάζα στο παρακάτω πλαίσιο.
3. Ετοιμάστε λίγο νερό σε θερμοκρασία  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  μικρότερη από του δωματίου. Μεταφέρετε περίπου  $50\text{ g}$  από αυτό το νερό στο εσωτερικό δοχείο. Αφότου το νερό και το δοχείο έρθουν σε θερμική ισορροπία, μπορείτε να ξεκινήσετε το πείραμα. Πρέπει η θερμοκρασία να είναι περίπου  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  μικρότερη από του δωματίου. Αυτό είναι απαραίτητο για να αντισταθμιστεί η θερμороή από το δωμάτιο προς το δοχείο.
4. Ζυγίστε το δοχείο μαζί με το νερό και υπολογίστε την μάζα του νερού. Καταγράψτε την στο παρακάτω πλαίσιο.
5. Βάλτε το μικρό δοχείο μέσα στο μεγάλο χρησιμοποιώντας τον μαύρο πλαστικό δακτύλιο. Τοποθετήστε το καπάκι και εισάγετε τον αντιστάτη και το θερμόμετρο.
6. Ελέγξτε την θερμοκρασία του νερού ξανά. Αν το νερό έχει ζεσταθεί πολύ, ακουμπήστε το θερμιδόμετρο σε ένα λουτρό πάγου και έπειτα σκουπίστε το καλά.
7. Ξεκινήστε την εγγραφή.

8. Συνδέστε τον αντιστάτη στην πλαστική βάση του τροφοδοτικού. Παρατηρείστε το διάγραμμα ισχύος. Θα πρέπει η ισχύς να είναι κάτω από 10 Watts συνεχώς. Αν η ισχύς ξεπεράσει το όριο, βγάλτε το τροφοδοτικό από την πρίζα.
9. Κουνήστε απαλά το θερμιδόμετρο για να έχετε ομοιόμορφη θερμοκρασία.
10. Παρακολουθήστε την θερμοκρασία στο διάγραμμα μέχρις ότου φτάσει τόσο πάνω από την θερμοκρασία δωματίου όσο κάτω ξεκίνησε. Βγάλτε το τροφοδοτικό από την πρίζα.
11. Συνεχίστε την εγγραφή μέχρι η θερμοκρασία να σχηματίσει ένα 'πλατώ' ή να αρχίσει να μειώνεται. Μην ξεχνάτε να ανακατεύετε το νερό κουνώντας το θερμιδόμετρο.
12. Σταματήστε την εγγραφή.

### Επεξεργασία μετρήσεων

1. Χρησιμοποιήστε το εργαλείο συντεταγμένων και συγκεκριμένα το "Delta Tool" για να βρείτε την αλλαγή της θερμοκρασίας,  $\Delta T$ .

2. Υπολογίστε την συνολική θερμότητα,  $Q$ , που προστέθηκε στο νερό και στο δοχείο. Χρησιμοποιήστε κατάλληλες τιμές θερμοχωρητικότητας για το καθένα. Χρησιμοποιήστε την ειδική θερμοχωρητικότητα σε μονάδες  $\text{cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$  ώστε η θερμότητα να βγει σε θερμίδες. ( $c_{\text{water}} = 1.00 \text{ cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$  και  $c_{\text{Aluminum}} = 0.215 \text{ cal}/(\text{g}\cdot^\circ\text{C})$ ).

$$Q = Q_{\text{Water}} + Q_{\text{Cup}}$$

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

3. Υπολογίστε το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη Ισχύος-Χρόνου χρησιμοποιώντας το εργαλείο "Area" στο μενού "Statistics". Αυτή είναι η ενέργεια που προσδόθηκε στο νερό και στο δοχείο.

4. Ορίστε την θερμότητα (σε θερμίδες) ίση με την ενέργεια που προσδόθηκε (σε Joule). Υπολογίστε πόσα Joules ισούνται με μία θερμίδα. Βρείτε την πραγματική τιμή και υπολογίστε πόσο διαφέρει η τιμή σας από την πραγματική.



### Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Σε αυτό το πείραμα ενέργεια κερδήθηκε ή χάθηκε; Εξηγήστε τα αποτελέσματά σας χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

2. Ήταν η απάντησή σας μεγαλύτερη ή μικρότερη από την αποδεκτή τιμή; Ποιος παράγοντας του πειράματος μπορεί να προκάλεσε αυτό το σφάλμα;

3. Γιατί είναι απαραίτητο να ξεκινήσετε με θερμοκρασία κάτω από αυτήν του δωματίου και να σταματήσετε με αντίστοιχη πάνω;

4. Η θερμίδα που χρησιμοποιείται στα τρόφιμα (με κεφαλαίο C) είναι χίλιες θερμίδες,  $1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal}$ . Πόσες Calories προσθέσατε στο νερό και το δοχείο; Αν αυτό το ποσό ενέργειας το χρησιμοποιούσατε για να ανυψώσετε το νερό (αυτά τα περίπου 50 g), πόσο ψηλά θα έφτανε το νερό;

## Πείραμα Β

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Όταν θερμότητα μεταφέρεται σε ένα σώμα τότε αυτό αυξάνεται η θερμοκρασία του σύμφωνα με την Εξίσωση 4:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα,  $m$  είναι η μάζα του σώματος,  $c$  είναι η ειδική θερμότητα (ειδική θερμότητα) του σώματος και  $\Delta T$  είναι η μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος. Η θερμότητα που έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή της θερμοκρασίας του σώματος ονομάζεται 'αισθητή' θερμότητα.

Αν το σώμα είναι αρχικά στερεό ή υγρό και θερμότητα συνεχίζει να του παρέχεται, τότε κάποια στιγμή το σώμα θα αλλάξει φάση. Η θερμότητα που χρειάζεται για να αλλάξει φάση ονομάζεται 'λανθάνουσα' και δίνεται από την Εξίσωση 5:

$$Q = m \cdot L \quad (5)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα,  $m$  είναι η μάζα του σώματος και  $L$  είναι η ειδική λανθάνουσα θερμότητα του σώματος.

Σε αυτό το πείραμα, το νερό+δοχείο χάνουν θερμότητα και ψύχονται, ενώ ο πάγος απορροφά θερμότητα και στην αρχή πρώτα λιώνει (και γίνεται παγό-νερο) και στην συνέχεια το παγό-νερο αυξάνει θερμοκρασία μέχρι να φτάσει σε θερμική ισορροπία με το νερό+δοχείο.

### Ρυθμίσεις

Αν πέσει νερό μεταξύ των δύο δοχείων, σκουπίστε το. Δεν θα πρέπει να υπάρχει καθόλου υγρασία ανάμεσα στα δύο δοχεία προκειμένου οι μετρήσεις να έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για αυτό το πείραμα θα χρειασθούν συμπαγή παγάκια κατά προτίμηση μικρά. Ο πάγος που μόλις έχει βγει από τον καταψύκτη είναι πολύ πιο κρύος από 0 °C, οπότε δεν πρέπει να χρησιμοποιηθεί αμέσως. Πρέπει να περιμένετε μέχρι να αρχίσει να λιώνει.

### Εκτέλεση της άσκησης

Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα 1.

1. Μετρήστε την θερμοκρασία δωματίου και ζυγίστε το εσωτερικό δοχείο του θερμιδόμετρου.
2. Ετοιμάστε λίγο νερό σε θερμοκρασία περίπου 8 °C πάνω από την θερμοκρασία δωματίου. Προσθέστε περίπου 40 g από αυτό το νερό στο δοχείο. Ζυγίστε και πάλι το δοχείο και βρείτε την μάζα του νερού.

Αφότου το νερό και το δοχείο έρθουν σε θερμική ισορροπία και είστε έτοιμοι να ξεκινήσετε το πείραμα, θα πρέπει η θερμοκρασία ισορροπίας να είναι τουλάχιστον 5 °C πάνω από την θερμοκρασία δωματίου.

3. Συναρμολογήστε το θερμιδόμετρο, βάλτε το καπάκι και ένα θερμόμετρο με μεταλλικό στέλεχος.
4. Ετοιμάστε περίπου 5 g πάγου.
5. Ελέγξτε ξανά την θερμοκρασία του νερού+δοχείο. Αν δεν έχει την σωστή θερμοκρασία μπορείτε να ακουμπήσετε το θερμιδόμετρο σε ένα λουτρό πάγου, αλλά μετά σκουπίστε το καλά.
6. Καταγράψτε την αρχική θερμοκρασία του νερού+δοχείο με ακρίβεια τουλάχιστον 0.1 °C.
7. Σκουπίστε το παγάκι και βάλτε το μέσα στο θερμιδόμετρο. Κουνάτε απαλά το θερμιδόμετρο κάθε λίγο για να ανακατεύεται το περιεχόμενο και να έχει ομοιόμορφη θερμοκρασία.
8. Συνεχίστε έως ότου η θερμοκρασία φτάσει την ελάχιστη τιμή της. Σηκώστε το καπάκι και βεβαιωθείτε ότι έχει λιώσει όλος ο πάγος. Αν όχι, σκεπάστε και συνεχίστε. Καταγράψτε την ελάχιστη θερμοκρασία.
9. Αφαιρέστε το εσωτερικό δοχείο και ζυγίστε το. Με αυτήν την τιμή θα βρείτε την μάζα του πάγου που προσθέσατε.

Πίνακας 1.

Μάζα δοχείου	(kg)
Μάζα νερού+δοχείο	(kg)
Μάζα νερού	(kg)
Μάζα νερό+δοχείο+πάγος	(kg)
Μάζα πάγου	(kg)
Θερμοκρασία δωματίου	(°C)
Αρχική θερμοκρασία νερού+δοχείο	(°C)
Ελάχιστη θερμοκρασία	(°C)

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε την αλλαγή θερμοκρασίας του νερού+δοχείο.

2. Υπολογίστε την αλλαγή θερμοκρασίας του παγό-νερου.

3. Υπολογίστε την θερμότητα,  $Q_{lost}$ , που έχασε το νερό+δοχείο. Χρησιμοποιήστε την κατάλληλη θερμοχωρητικότητα για κάθε υλικό.

4. Υπολογίστε την θερμότητα,  $Q_{gained}$ , που απορρόφησε ο πάγος. Αυτός ο υπολογισμός έχει δύο όρους, λανθάνουσα θερμότητα και αισθητή.

5. Ποιο ποσοστό θερμότητας που παρέχει το νερο+δοχείο απορροφά ο πάγος; Βρείτε την διαφορά:

$$\% \text{ διαφορά} = \frac{Q_{lost} - Q_{gained}}{Q_{lost}} \cdot 100$$

6. Το όλο σύστημα έχασε ή κέρδισε ενέργεια; Εξηγήστε χρησιμοποιώντας την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

### Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Γιατί μπήκατε στον κόπο να ξεκινήσετε με νερό θερμοκρασίας μεγαλύτερης από του δωματίου; Τι πετύχατε με αυτό;

2. Γιατί στους υπολογισμούς περιλαμβάνουμε μόνο το εσωτερικό δοχείο; Γιατί δεν περιλαμβάνουμε και τον μαύρο πλαστικό δακτύλιο; Γιατί δεν είναι ο δακτύλιος φτιαγμένος από αλουμίνιο;

3. Γιατί το κενό ανάμεσα στα δύο δοχείο λειτουργεί ως μόνωση; Ιδανικά τι θα θέλαμε να έχει μέσα σε αυτό το κενό;

4. Γιατί σκουπίσατε το παγάκι προτού το βάλετε μέσα στο θερμιδόμετρο;

## Πείραμα Γ

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε πραγματικά συστήματα και σε αυθόρμητες μεταβολές, η εντροπία μετά την μεταβολή είναι μεγαλύτερη από την εντροπία πριν την μεταβολή. Η αλλαγή της εντροπίας ( $\Delta S$ ) ενός συστήματος ισούται με την θερμότητα,  $dQ$ , που μεταφέρθηκε στο σύστημα το οποίο έχει θερμοκρασία  $T$  και δίνεται από την Εξίσωση 6:

$$dS = \int_{\alpha\rho\chi}^{\tau\epsilon\lambda} \frac{dQ}{T} \quad (6)$$

Η θερμότητα δίνεται από την Εξίσωση 4 και αν θεωρήσουμε τις  $m$  και  $c$  σταθερές τότε παίρνουμε την Εξίσωση 7:

$$dS = m \cdot c \cdot \int_{\alpha\rho\chi}^{\tau\epsilon\lambda} \frac{dT}{T} \quad (7)$$

Ολοκληρώνοντας παίρνουμε την Εξίσωση 7 για την μεταβολή της εντροπίας:

$$\Delta S = S_{\tau\epsilon\lambda} - S_{\alpha\rho\chi} = m \cdot c \cdot \ln \left( \frac{T_{\tau\epsilon\lambda}}{T_{\alpha\rho\chi}} \right) \quad (8)$$

Στο πείραμα Γ θερμό νερό αναμειγνύεται με ψυχρό μέσα στο θερμιδόμετρο. Το ψυχρό νερό μαζί με το αλουμινένιο δοχείο είναι το ένα σύστημα και το θερμό νερό που προστίθεται μετά είναι το άλλο σύστημα. Η μεταβολή της εντροπίας κάθε συστήματος υπολογίζεται από την Εξίσωση 8.

Τα δύο συστήματα θα έχουν διαφορετικό πρόσημο για την  $\Delta S$ . Αύξηση της εντροπίας σημαίνει ότι το σύστημα βρέθηκε σε μια κατάσταση μεγαλύτερης αταξίας στο τέλος της μεταβολής από όση είχε στην αρχή. Αν δοθεί θερμότητα στο σύστημα,  $dQ > 0$ , τότε από την Εξίσωση 3 προκύπτει ότι η εντροπία θα αυξηθεί. Αυτό σημαίνει ότι η αταξία θα αυξηθεί, δηλαδή θα αυξηθεί η θερμοκρασία.

## Εκτέλεση της άσκησης

Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα 2.

Αν πέσει νερό μεταξύ των δύο δοχείων, σκουπίστε το. Δεν θα πρέπει να υπάρχει καθόλου υγρασία ανάμεσα στα δύο δοχεία προκειμένου οι μετρήσεις να έχουν ακρίβεια.

1. Προσθέστε στο δοχείο περίπου 30 g πάγο-νερό, αλλά με σχεδόν καθόλου πάγο.
2. Ζυγίστε το δοχείο και υπολογίστε την μάζα του πάγου-νερού.
3. Συναρμολογήστε το θερμιδόμετρο και τοποθετήστε ένα θερμόμετρο με μεταλλικό στέλεχος. Το νερό πλέον δεν θα πρέπει να περιέχει καθόλου πάγο.
4. Βάλτε περίπου 100 g ζεστό νερό σε ένα μονωμένο δοχείο και βάλτε και ένα δεύτερο θερμόμετρο μέσα εκεί.
5. Κουνήστε απαλά τα δύο δοχεία και καταγράψτε τις αρχικές θερμοκρασίες του ζεστού και του κρύου νερού με ακρίβεια τουλάχιστον 0.1 °C. Ρίξτε περίπου 30 g από το ζεστό νερό μέσα στο θερμιδόμετρο. Θα πρέπει το περιεχόμενο να είναι τουλάχιστον 1 εκατοστό χαμηλότερα από το πάνω μέρος του εσωτερικού δοχείου. Τοποθετήστε το καπάκι και παρακολουθήστε την θερμοκρασία του περιεχομένου. Κουνήστε απαλά το θερμιδόμετρο ώστε να ανακατευτούν τα δύο νερά και καταγράψτε την τελική θερμοκρασία όταν επέλθει ισορροπία.
6. Αφαιρέστε το θερμόμετρο από το θερμιδόμετρο και τοποθετήστε το δεύτερο θερμόμετρο για να ελέγξετε ότι και τα δύο όργανα δείχνουν την ίδια θερμοκρασία. Αν δείχνουν διαφορετικές θερμοκρασίες, καταγράψτε την διαφορά τους και προσαρμόστε τις ενδείξεις κατάλληλα.
7. Ζυγίστε ξανά το εσωτερικό δοχείο και υπολογίστε την μάζα του ζεστού νερού που προσθέσατε.

Πίνακας 2.

Μάζα δοχείου		(kg)
Μάζα πάγου-νερού+δοχείο		(kg)
Μάζα πάγου-νερού		(kg)
Μάζα κρύο νερό+δοχείο+ζεστό νερό		(kg)
Μάζα ζεστού νερού		(kg)
Θερμοκρασία δωματίου		(°C)
Αρχική θερμοκρασία κρύου νερού+δοχείο	(°C)	(K)
Αρχική θερμοκρασία ζεστού νερού	(°C)	(K)
Ένδειξη θερμοκρασίας ισορροπίας 1 <sup>ου</sup> θερμομέτρου		(°C)
Ένδειξη θερμοκρασίας ισορροπίας 2 <sup>ου</sup> θερμομέτρου		(°C)
Διαφορά των δύο θερμομέτρων		(°C)

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε την αλλαγή της θερμοκρασίας,  $\Delta T$  του κρύου νερού+δοχείο.

2. Υπολογίστε την αλλαγή της θερμοκρασίας του ζεστού νερού.

3. Υπολογίστε την θερμότητα,  $Q_{gained}$ , που προστέθηκε στο κρύο νερό+δοχείο. Χρησιμοποιήστε την κατάλληλη θερμοχωρητικότητα για κάθε υλικό.

4. Υπολογίστε την θερμότητα,  $Q_{lost}$ , που αφαιρέθηκε από το ζεστό νερό.

5. Πόση από την θερμότητα που αφαιρέθηκε από το ζεστό νερό, απορροφήθηκε από το κρύο νερό+δοχείο; Υπολογίστε το ποσοστό:

$$\% \text{ διαφορά} = \frac{Q_{lost} - Q_{gained}}{Q_{lost}} \cdot 100$$

6. Αν κάνατε προσεκτικά το πείραμα, αυτό το ποσοστό θα πρέπει να είναι περίπου 1 με 2 %. Αν δεν είναι, ελέγξτε πιθανά λάθη. Αν το ποσοστό είναι πάνω από 5 %, επαναλάβετε το πείραμα.

7. Χρησιμοποιήστε την Εξίσωση 8 για να υπολογίσετε την αλλαγή της εντροπίας του κρύου νερού+δοχείο. Προσέξτε οι υπολογισμοί να γίνουν σε Kelvin. Επίσης προσέξτε ποια είναι η αρχική και ποια η τελική θερμοκρασία, γιατί αυτή η επιλογή επηρεάζει το πρόσημο της αλλαγής εντροπίας.

8. Χρησιμοποιήστε την Εξίσωση 8 για να υπολογίσετε την αλλαγή της εντροπίας του ζεστού νερού.

9. Υπολογίστε την συνολική αλλαγή εντροπίας ολόκληρου του συστήματος.

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Καθορίστε το πρόσημο της αλλαγής εντροπίας του κρύου νερού+δοχείου και της αλλαγής του ζεστού νερού. Εξηγήστε έχοντας κατά νου την αταξία.

2. Καθορίστε το πρόσημο της αλλαγής εντροπίας ολόκληρου του συστήματος. Εξηγήστε έχοντας κατά νου τον ορισμό της εντροπίας και τις αυθόρμητες διαδικασίες



### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί η θερμική αγωγιμότητα στερεών υλικών τα οποία βρίσκονται σε σταθερή διαφορά θερμοκρασίας.

### Περιγραφή

Η πειραματική Διάταξη Θερμικής Αγωγιμότητας αποτελείται από μία συσκευή παραγωγής ατμού και μία βάση όπου τοποθετείται το προς εξέταση δείγμα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Στην επάνω πλευρά του δείγματος τοποθετείται πάγος. Ο ατμός μεταφέρεται μέσω εύκαμπτων σωλήνων στην κάτω πλευρά του δείγματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, το δείγμα βρίσκεται μεταξύ μιας σταθερής διαφοράς θερμοκρασίας  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Η θερμότητα που μεταφέρεται από την θερμή πλευρά στην ψυχρή, ισούται με την λανθάνουσα θερμότητα που χρειάζεται για να αλλάξει φάση ο πάγος και από στερεός να γίνει υγρό. Είναι γνωστό ότι για να λιώσει  $1\text{ γραμμάριο}$  πάγου και να μετατραπεί σε νερό  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , χρειάζονται  $334.72\text{ J}$ . Άρα η θερμότητα που περνάει διαμέσου του δείγματος μπορεί να υπολογιστεί από την ποσότητα του πάγου που λιώνει.



Σχήμα 1. Η Διάταξη Θερμικής Αγωγιμότητας μαζί με 5 δείγματα.

Στην συγκεκριμένη πειραματική άσκηση θα εξεταστούν πλάκες από τα εξής στερεά υλικά: γυαλί, πλεξιγκλάς, ξύλο, χαρτόνι και γύψος.

## Θεωρητικό υπόβαθρο

Η θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή δίνεται από την Εξίσωση 1:

$$\Delta Q = (k \cdot A \cdot \Delta T \cdot \Delta t) / h \quad (1)$$

όπου  $\Delta Q$  είναι η θερμότητα που μεταφέρθηκε,  $A$  είναι η επιφάνεια του σώματος κάθετα στην οποία ρέει το ρεύμα θερμότητας,  $\Delta T$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας η οποία προκαλεί την ροή θερμότητας,  $\Delta t$  είναι το χρονικό διάστημα στο οποίο συμβαίνει η ροή θερμότητας και  $h$  είναι το πάχος του σώματος. Ο όρος  $k$  είναι η θερμική αγωγιμότητα του στερεού σώματος.

Οι μονάδες της θερμικής αγωγιμότητας στο S.I. είναι  $W/(m \cdot K)$ . Ένα υλικό που είναι καλός αγωγός της θερμότητας (π.χ. ένα μέταλλο) έχει μεγάλη  $k$ . Αντίθετα ένα μονωτικό υλικό (π.χ. ένα πλαστικό, ένα ξύλο ή ένα φελιζόλ) έχει μικρή  $k$ .

Η θερμότητα που χρειάζεται για να αλλάξει φάση ο πάγος και να γίνει νερό δίνεται από την Εξίσωση 2:

$$\Delta H = m_w \cdot L \quad (2)$$

όπου  $\Delta H$  είναι η θερμότητα που χρειάζονται  $m_w$  γραμμάρια πάγου για να γίνουν νερό θερμοκρασίας  $0^\circ C$ ,  $m_w$  είναι η ποσότητα πάγου που έλιωσε και  $L$  είναι η ειδική λανθάνουσα θερμότητα του πάγου που ισούται με  $334.72 \text{ J/g}$ .

Θεωρώντας ότι η θερμοκρασία του δωματίου δεν συνδράμει στο λιώσιμο του πάγου, τότε θα ισχύει η Εξίσωση 3:

$$\Delta Q = \Delta H \quad (3)$$

Τελικά, μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμική αγωγιμότητα από την Εξίσωση 4:

$$k = \frac{m_w}{\Delta t} \cdot \frac{L \cdot h}{A \cdot \Delta T} \quad (4)$$

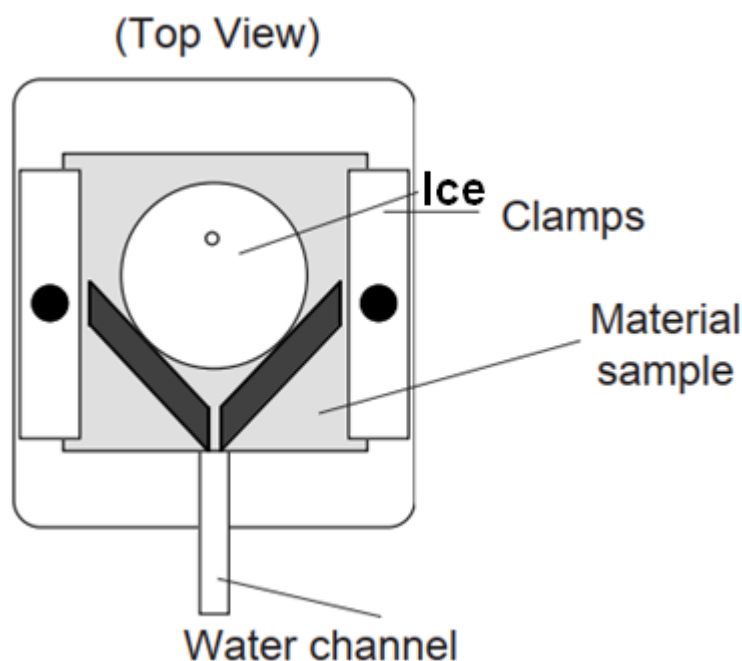
Στην πραγματικότητα υπάρχει και ένα μέρος του πάγου που λιώνει εξαιτίας της θερμοκρασίας δωματίου,  $m_{wa}$ .

## Εκτέλεση της άσκησης

Να καταγράψετε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα 1.

1. Γεμίστε το πλαστικό δοχείο με νερό και βάλτε το στον καταψύκτη για να παγώσει. Το δοχείο αυτό έχει σταθερή διάμετρο ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε ανά πάσα στιγμή την διάμετρο του πάγου. Επίσης, το δοχείο είναι από πλαστικό που βοηθάει στην θερμομόνωση του πάγου κατά την διάρκεια του πειράματος.

2. Τοποθετήστε το δείγμα από γυαλί στην ειδική βάση και σφίξτε ελαφρά τους σφιγκτήρες ώστε να μην μπορεί να διαφύγει ατμός από την κάτω πλευρά του δείγματος (βλέπε Σχήμα 2). Το μαύρο τρίγωνο από το αφρώδες νεοπρέν που είναι κολλημένο πάνω σε κάθε δείγμα, θα πρέπει να δείχνει προς το αλουμινένιο κανάλι που οδηγεί το νερό από το λιώσιμο του πάγου στο γυάλινο δοχείο συλλογής (δοχείο A).
3. Ζυγίστε το γυάλινο δοχείο συλλογής λιωμένου πάγου (δοχείο A) και μετρήστε το πάχος ( $h$ ) όλων των δειγμάτων.



Σχήμα 2. Τοποθέτηση του δείγματος στην ειδική βάση.

4. Πάρτε από τον καταψύκτη το παγωμένο δοχείο και ρίξτε ζεστό νερό γύρω του ώστε να ξεκολλήσει ο πάγος.
5. Μετρήστε την διάμετρο του πάγου ( $d_1$ ). Πάρτε την μέτρηση γρήγορα γιατί αλλιώς το παχύμετρο θα λιώσει τον πάγο τοπικά και θα δείξει μικρότερη διάμετρο από την πραγματική. Καλύτερα να χρησιμοποιήσετε πλαστικό παχύμετρο.
6. Τοποθετήστε τον πάγο στην επάνω πλευρά του δείγματος μαζί με το πλαστικό δοχείο του. Συλλέγετε το νερό που θα τρέξει σε ένα δοχείο (δοχείο B).
7. Περιμένετε μερικά λεπτά ώστε ο πάγος να αρχίσει να λιώνει και να έρθει σε πλήρη επαφή με το δείγμα.
8. Βάλτε το δοχείο A κάτω από το αλουμινένιο κανάλι και ξεκινήστε μία μέτρηση διάρκειας 10 λεπτών ( $t_a$ ).

9. Μόλις τελειώσει η μέτρηση, αλλάξτε το δοχείο A με το δοχείο B και ζυγίστε το δοχείο A ώστε να βρείτε πόσο νερό συνέλλεξε. Αυτήν την ποσότητα θα την ονομάσουμε  $m_{wa}$ .
10. Γεμίστε με περίπου 500 mL νερό την συσκευή παραγωγής ατμού και θέστε την σε λειτουργία στην μέγιστη ένταση. Συνδέστε ένα εύκαμπτο σωληνάκι από την συσκευή στην επάνω υποδοχή της ειδικής βάσης. Συνδέστε ένα δεύτερο σωληνάκι στην κάτω υποδοχή της βάσης. Αυτό το δεύτερο σωληνάκι βάλτε το μέσα σε ένα δοχείο (δοχείο Γ) ώστε να μαζεύει το νερό που συμπυκνώνεται μέσα στην βάση.
11. Επαναλάβετε το βήμα 8, αλλά για 5 λεπτά ( $t$ ) αυτήν την φορά. Την μάζα νερού που θα συλλεχθεί θα την ονομάσουμε  $m_w$ .
12. Αφού τελειώσει η μέτρηση, ξαναμετρήστε την διάμετρο του πάγου ( $d_2$ ).
13. Επαναλάβετε τα βήματα 11-12 για όλα τα δείγματα.

Πίνακας 1. Μετρήσεις.

$h$ (mm)	$d_1$ (mm)	$d_2$ (mm)	$t_a$ (s)	$m_{wa}$ (g)	$t$ (s)	$m_w$ (g)
					–	–
			–	–		
			–	–		
			–	–		
			–	–		

## Επεξεργασία μετρήσεων

Συμπληρώστε τους υπολογισμούς σας στον Πίνακα 2. Προσέξτε να είναι οι μονάδες τώρα σε S.I.

5. Βρείτε την μέση διάμετρο του πάγου κατά την διάρκεια κάθε πειράματος ( $d_{avg}$ ).
6. Χρησιμοποιώντας την  $d_{avg}$  βρείτε την επιφάνεια συναλλαγής θερμότητας  $A$ .
7. Βρείτε τους ρυθμούς λιωσίματος του πάγου για θερμοκρασία δωματίου ( $\dot{m}_{wa}$ ) και για λειτουργία με ατμό ( $\dot{m}_{w0}$ ).
8. Βρείτε τον ρυθμό λιωσίματος αν δεν υπήρχαν οι απώλειες από το δωμάτιο, δηλ.  $\dot{m}_w = \dot{m}_{w0} - \dot{m}_{wa}$ .
9. Υπολογίστε την αγωγιμότητα.

Πίνακας 2. Υπολογισμοί.

$d_{avg}$ (m)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$\dot{m}_{wa}$ (kg/s)	$\dot{m}_{w0}$ (kg/s)	$\dot{m}_w$ (kg/s)	$k$ (W/(m·K))


## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Συγκρίνετε τις τιμές που βρήκατε για την αγωγιμότητα με πραγματικές τιμές. Πού μπορεί να οφείλεται πιθανή απόκλιση;

2. Ποιο από τα υλικά είναι καλύτερος μονωτής;

3. Για να πετύχουμε καλύτερη μόνωση στους τοίχους ενός σπιτιού, βάζουμε δύο φύλλα φελιζόλ αντί για ένα. Με αυτόν τον τρόπο μειώνουμε την αγωγιμότητα στο μισό;

### Σκοπός

Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να μελετηθεί η εξάρτηση της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας από την μορφή (χρώμα και υφή) της επιφάνειας που εκπέμπει. Επίσης, θα προσδιοριστεί η σχέση που συνδέει την ένταση της ακτινοβολίας με την απόσταση από την πηγή εκπομπής (Νόμος Αντιστρόφου Τετραγώνου). Τέλος θα προσδιοριστεί η σχέση της ροής θερμικής ακτινοβολίας με την θερμοκρασία του σώματος που εκπέμπει (Stefan-Boltzmann), είτε αυτό βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, είτε σε χαμηλή θερμοκρασία.

### Περιγραφή

Η πειραματική διάταξη απεικονίζεται στο Σχήμα 1 και αποτελείται από έναν αισθητήρα ακτινοβολίας, έναν λαμπτήρα υψηλής θερμοκρασίας, μία θερμαινόμενη πλάκα, έναν κύβο του Leslie, μία ρυθμιζόμενη πηγή συνεχούς τάσης, ένα αμπερόμετρο και δύο βολτόμετρα.



Σχήμα 1. Διάταξη αδιαβατικών μεταβολών αερίου.

Ο αισθητήρας ακτινοβολίας αποτελείται από θερμοπύλες οι οποίες θερμαίνονται όταν πέσει πάνω τους ακτινοβολία και έπειτα παράγουν μια μικρή τάση (mV). Αυτήν την τάση μπορούμε να την μετρήσουμε με ένα βολτόμετρο. Πάνω στον αισθητήρα υπάρχει το κουμπί “Tare” το οποίο θέτει την τάση που δημιουργείται από την ακτινοβολία του δωματίου ως τάση αναφοράς και την συγκρίνει με την τάση όταν ακτινοβοληθεί από τον λαμπτήρα. Ο αισθητήρας διαθέτει ένα μεταλλικό κλείστρο το οποίο θα πρέπει να κλείνει αμέσως μετά από κάθε μέτρηση, αλλιώς οι θερμοπύλες θα συνεχίσουν θερμαίνονται και θα δίνουν λάθος αποτελέσματα. Με το άνοιγμα και κλείσιμο του κλείστρου, ο αισθητήρας μπορεί να μετακινηθεί, οπότε για τις ασκήσεις που ο αισθητήρας πρέπει να είναι αυστηρά ακίνητος, παρέχονται δύο μεταλλικές πλάκες που κρατιούνται από τον χρήστη χωρίς να ακουμπάνε με τον αισθητήρα.

Ο κύβος του Leslie είναι ένας απλός κύβος από λαμαρίνα στον οποίο κάθε πλευρά έχει είτε διαφορετικό χρώμα είτε διαφορετική στιλπνότητα. Ο κύβος αν θερμανθεί εκπέμπει ακτινοβολία και σκοπός είναι η μέτρηση της από κάθε πλευρά του κύβου. Ο κύβος του Leslie θερμαίνεται ομοιόμορφα βάζοντας ζεστό νερό μέσα του και μπορεί να τοποθετηθεί πάνω σε θερμαινόμενη πλάκα προκειμένου να διατηρηθεί σε σταθερή θερμοκρασία για ώρα.

Ο λαμπτήρας είναι ένας απλός λαμπτήρας αυτοκινήτου ο οποίος μπορεί να φτάσει μέχρι και τους 3000 °C, επιτρέποντας έτσι την μελέτη της σχέσης Stefan-Boltzmann αφού η θερμοκρασία δωματίου είναι αμελητέα σε

σχέση με αυτήν του λαμπτήρα. Επειδή το νήμα του λαμπτήρα είναι μικρό σε μέγεθος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σαν σημειακή πηγή θερμικής ακτινοβολίας επιτρέποντας έτσι την μελέτη του νόμου του αντιστρόφου τετραγώνου. Η θερμοκρασία του νήματος βρίσκεται αν είναι γνωστή η αντίστασή του. Για τον λόγο αυτόν μετريέται το ρεύμα και η τάση του νήματος. Ο λαμπτήρας τροφοδοτείται από την πηγή τάσης με διάφορες τιμές τάσης, οπότε και αποκτάει διάφορες θερμοκρασίες.

**Στην συγκεκριμένη άσκηση θα γίνουν τρία πειράματα:**

- A. Μελέτη εκπομπής ακτινοβολίας από διάφορες επιφάνειες με τον κύβο του Leslie.
- B. Μελέτη του νόμου αντιστρόφου τετραγώνου.
- Γ. Μελέτη της σχέσης Stefan-Boltzmann.

## Πείραμα Α

### Ρυθμίσεις

1. Συνδέστε τον αισθητήρα με ένα βολτόμετρο και ρυθμίστε την κλίμακά του ώστε να ταιριάζει με την τάση εξόδου του αισθητήρα.
2. Ένας χρήστης θα πρέπει να καλύπτει τον αισθητήρα με τα προστατευτικά μεταλλικά φύλλα όταν δεν γίνεται μέτρηση.
3. Γεμίστε τον κύβο με ζεστό νερό μέχρι 3 εκατοστά περίπου από το χείλος του.
4. Τοποθετείστε ένα θερμομέτρο μέσα στο κύβο.
5. Τοποθετήστε τον αισθητήρα περίπου 5 εκατοστά μακριά από την μία πλευρά του κύβου. Ο αισθητήρας θα πρέπει να μείνει σταθερός σε αυτήν την θέση για όλη την διάρκεια του πειράματος.
6. Ένας δεύτερος χρήστης θα πρέπει να φορέσει προστατευτικά γάντια φούρνου.

### Εκτέλεση της άσκησης

Καταγράψτε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα 1. Οι μετρήσεις στις τέσσερις πλευρές του κύβου θα πρέπει να γίνουν γρήγορα, ώστε να διασφαλιστεί ότι μέχρι να περιστραφεί ο κύβος κατά  $360^\circ$ , το νερό δεν έχει κρυώσει. **ΠΡΟΣΟΧΗ: Τον κύβο πρέπει να τον χειρίζεται ο χρήστης που φοράει τα κατάλληλα γάντια και μόνο αυτός, διότι είναι αρκετά ζεστός.**

1. Καταγράψτε την ένδειξη του θερμομέτρου.
2. Αφαιρέστε τα προστατευτικά φύλλα μπροστά από τον αισθητήρα και καταγράψτε την ένδειξη του βολτόμετρου.
3. Τοποθετήστε τα προστατευτικά φύλλα.
4. Περιστρέψτε τον κύβο κατά  $90^\circ$  ώστε να μετρήσετε την επόμενη επιφάνεια του. Βεβαιωθείτε ότι η επιφάνεια απέχει από τον αισθητήρα ακριβώς όσο η πρώτη επιφάνεια. Αφαιρέστε τα προστατευτικά φύλλα και καταγράψτε την ένδειξη του βολτομέτρου.
5. Επαναλάβετε για τις υπόλοιπες δύο επιφάνειες.



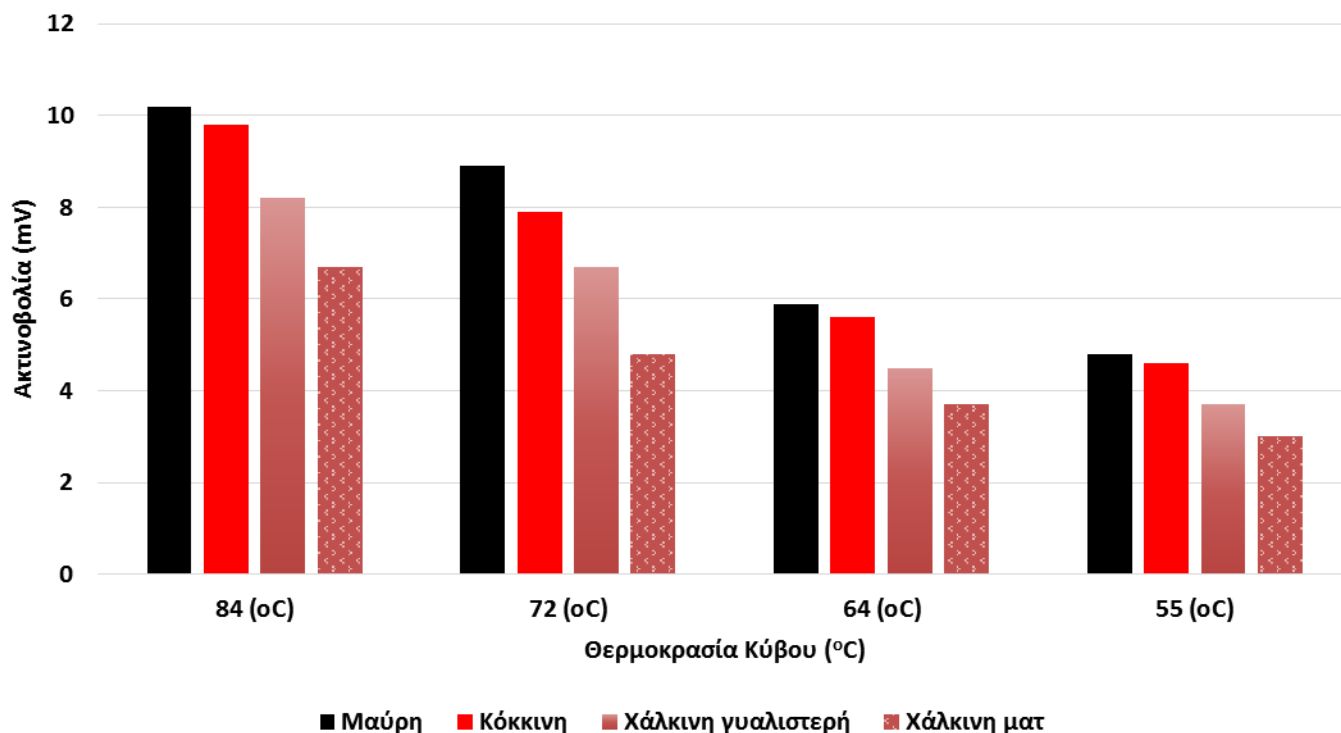
6. Περιμένετε λίγα λεπτά ώστε να πέσει η θερμοκρασία του κύβου κατά περίπου 10 °C και επαναλάβετε. Πάρτε μετρήσεις για συνολικά 4 θερμοκρασίες.

Πίνακας 1.

	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)	Θερμοκρασία (°C)
Επιφάνεια	Τάση (mV)	Τάση (mV)	Τάση (mV)	Τάση (mV)
Μαύρη				
Κόκκινη				
Χάλκινη Γυαλιστερή				
Χάλκινη Ματ				

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Δημιουργήστε ένα ραβδόγραμμα με τις μετρήσεις σας παρόμοιο με αυτό του Σχήματος 2.



Σχήμα 2. Ραβδόγραμμα ακτινοβολίας για κάθε επιφάνεια σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες.

2. Κατατάξετε τις επιφάνειες κατά σειρά ακτινοβολίας που εκπέμπουν. Είναι αυτή η σειρά ίδια για όλες τις θερμοκρασίες;

3. Γενικά ισχύει ότι οι καλοί απορροφητές είναι και καλοί πομποί. Οι μετρήσεις σας συμφωνούν με αυτό;

4. Δύο διαφορετικά σώματα με την ίδια θερμοκρασία εκπέμπουν διαφορετικής έντασης ακτινοβολία;

## **Πείραμα Β**

### **Ρυθμίσεις**

1. Κολλήστε με ταινία ένα μεγάλο μέτρο πάνω στο τραπέζι.
2. Τοποθετήστε την βάση του αισθητήρα ώστε να εφάπτεται με το μέτρο.
3. Τοποθετήστε τον λαμπτήρα στην ίδια ευθεία με τον αισθητήρα και ρυθμίστε το ύψος του αισθητήρα ώστε να συμπίπτει με αυτό του λαμπτήρα.
4. Συνδέστε τον αισθητήρα με το βολτόμετρο.
5. Συνδέστε σε σειρά το αμπερόμετρο με τον λαμπτήρα. Συνδέστε παράλληλα στα άκρα του λαμπτήρα ένα βολτόμετρο. Οι ακροδέκτες του βολτόμετρου θα πρέπει να τοποθετηθούν όσο πιο κοντά γίνεται στα άκρα του λαμπτήρα και όχι σε βύσματα που είναι ήδη συνδεδεμένα με τον λαμπτήρα. Μεταξύ του τροφοδοτικού και του λαμπτήρα υπάρχει πτώση τάσης. Το τροφοδοτικό π.χ. μπορεί να δίνει 10 V και στον λαμπτήρα τελικά να “φτάνουν” μόνο 7 V.
6. Συνδέστε τον λαμπτήρα στο τροφοδοτικό.

## Εκτέλεση της άσκησης

1. Με τον λαμπτήρα σβηστό πάρτε μετρήσεις ακτινοβολίας ανά 10 cm και συμπληρώστε τον Πίνακα 2. Βρείτε την μέση τιμή.
2. Τροφοδοτείστε τον λαμπτήρα
3. Τοποθετείστε τον λαμπτήρα στην ίδια ευθεία με τον αισθητήρα και ρυθμίστε το ύψος του αισθητήρα ώστε να συμπίπτει με αυτό του λαμπτήρα.
4. Τροφοδοτείστε τον λαμπτήρα με περίπου 10 V και πάρετε μετρήσεις για στις αποστάσεις που υπάρχουν στον Πίνακα 3. Μεταξύ των μετρήσεων να τοποθετείτε τα προστατευτικά φύλλα.
5. Σβήστε τον λαμπτήρα.

Πίνακας 2.

X (cm)	Ακτινοβολία (mV)
10	
20	
30	
40	
50	
60	
70	
80	
90	
100	
	Μέση ακτινοβολία =

Πίνακας 3.

X (cm)	Ακτινοβολία (mV)	$1/X^2$ (cm <sup>-2</sup> )	“Ακτινοβολία” – “Μέση Ακτιν. Δωματίου” (mV)
2.5			
3			
3.5			
4			
4.5			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
12			
14			
16			
18			
20			
25			
30			
35			
40			
45			
50			
60			
70			
80			
90			
100			

### Επεξεργασία μετρήσεων

- Υπολογίστε το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ πηγής ακτινοβολίας και αισθητήρα ( $1/X^2$ ) και συμπληρώστε τον Πίνακα 3.
- Αφαιρέστε την μέση ακτινοβολία του δωματίου από τις μετρήσεις με τον λαμπτήρα σε λειτουργία και συμπληρώστε την αντίστοιχη στήλη του Πίνακα 3.
- Αποτυπώστε σε διάγραμμα τα δεδομένα της τέταρτης στήλης του Πίνακα 3 σε συνάρτηση με την απόσταση X. Μην χαράξετε καμπύλη, σημειώστε μόνο τα σημεία. Βάλτε το διάγραμμα στο παρακάτω πλαίσιο.

4. Αποτυπώστε σε διάγραμμα τα δεδομένα της τέταρτης στήλης του Πίνακα 3 σε συνάρτηση με το τετράγωνο του αντιστρόφου της απόστασης ( $1/X^2$ ). Μην χαράξετε καμπύλη, σημειώστε μόνο τα σημεία. Βάλτε το διάγραμμα στο παρακάτω πλαίσιο.

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου λέει ότι η ενέργεια που ακτινοβολείται από μία σημειακή πηγή μειώνεται ανάλογα με το αντίστροφο του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή. Τα πειραματικά σας δεδομένα συμφωνούν με αυτόν τον νόμο. Εξηγήστε.

2. Τα σημεία του δεύτερου διαγράμματος δεν φαίνονται όλα να βρίσκονται πάνω σε ευθεία γραμμή. Ποια από αυτά ξεφεύγουν από την γραμμικότητα; Τα πρώτα ή τα τελευταία;

3. Είναι ο λαμπτήρας πραγματικά σημειακή πηγή; Αν όχι, πώς αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματά σας;

## Πείραμα Γ

### Θεωρητικό υπόβαθρο

Η σχέση των Stefan-Boltzmann συνδέει την ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας που εκπέμπεται από ένα σώμα με την θερμοκρασία του σώματος, σύμφωνα με την Εξίσωση 1:

$$R = \sigma \cdot T^4 \quad (1)$$

όπου  $R$  είναι η ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας,  $\sigma$  ( $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) είναι η σταθερά του Stefan-Boltzmann και  $T$  είναι η θερμοκρασία του σώματος σε Kelvin. Σε αυτήν την άσκηση, θεωρούμε ότι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι αμελητέα σε σχέση με την θερμοκρασία του νήματος.

### Ρυθμίσεις

1. Ρυθμίστε το πολύμετρο ώστε να μετράει σε Ohm και μετρήστε την αντίσταση του ίδιου του οργάνου. Πιθανά θα είναι κάπου στο 1 Ω.
2. Αποσυνδέστε τον λαμπτήρα από οτιδήποτε βρίσκεται πάνω του και μετρήστε όσο πιο κοντά γίνεται στο νήμα την αντίσταση του νήματος. Από αυτήν αφαιρέστε την αντίσταση του οργάνου, ώστε να έχετε την πραγματική αντίσταση του νήματος σε θερμοκρασία δωματίου ( $R_{ref}$ ). Καταγράψτε την τιμή αυτή. Επειδή το νήμα είναι φτιαγμένο από μέταλλο (βολφράμιο), είναι πολύ αγωγίμο οπότε η αντίστασή του θα είναι πολύ μικρή και αυτό δυσκολεύει την μέτρηση.
3. Τοποθετήστε τον αισθητήρα περίπου 5 εκατοστά μακριά από τον λαμπτήρα και στο ίδιο ύψος με το νήμα.
4. Συνδέστε τον αισθητήρα με το βολτόμετρο.
5. Συνδέστε σε σειρά το αμπερόμετρο με τον λαμπτήρα. Συνδέστε παράλληλα στα άκρα του λαμπτήρα ένα βολτόμετρο. Οι ακροδέκτες του βολτόμετρου θα πρέπει να τοποθετηθούν όσο πιο κοντά γίνεται στα άκρα του λαμπτήρα και όχι σε βύσματα που είναι ήδη συνδεδεμένα με τον λαμπτήρα. Μεταξύ του τροφοδοτικού και του λαμπτήρα υπάρχει πτώση τάσης. Το τροφοδοτικό π.χ. μπορεί να δίνει 10 V και στον λαμπτήρα τελικά να “φτάνουν” μόνο 7 V.
6. Συνδέστε τον λαμπτήρα στο τροφοδοτικό.

## Εκτέλεση της άσκησης

1. Μετρήστε την θερμοκρασία δωματίου ( $T_{ref}$ ) και καταγράψτε την στον Πίνακα 4.
2. Τροφοδοτήστε τον λαμπτήρα με ρεύμα και περιστρέψτε τον ρυθμιστή του τροφοδοτικού ώστε η ένδειξη του βολτομέτρου να γίνει περίπου 1 V. Μην καθυστερείτε προσπαθώντας να επιτύχετε ακριβώς 1 V.
3. Καταγράψτε στον Πίνακα 4 τις ενδείξεις από όλα τα μετρητικά όργανα.
4. Τοποθετήστε τα προστατευτικά μεταλλικά φύλλα μπροστά από τον αισθητήρα.
5. Αυξήστε την τάση κατά περίπου ακόμα 1 V και καταγράψτε τις μετρήσεις σας.
6. Επαναλάβετε την διαδικασία μέχρι και τα περίπου 12 V.

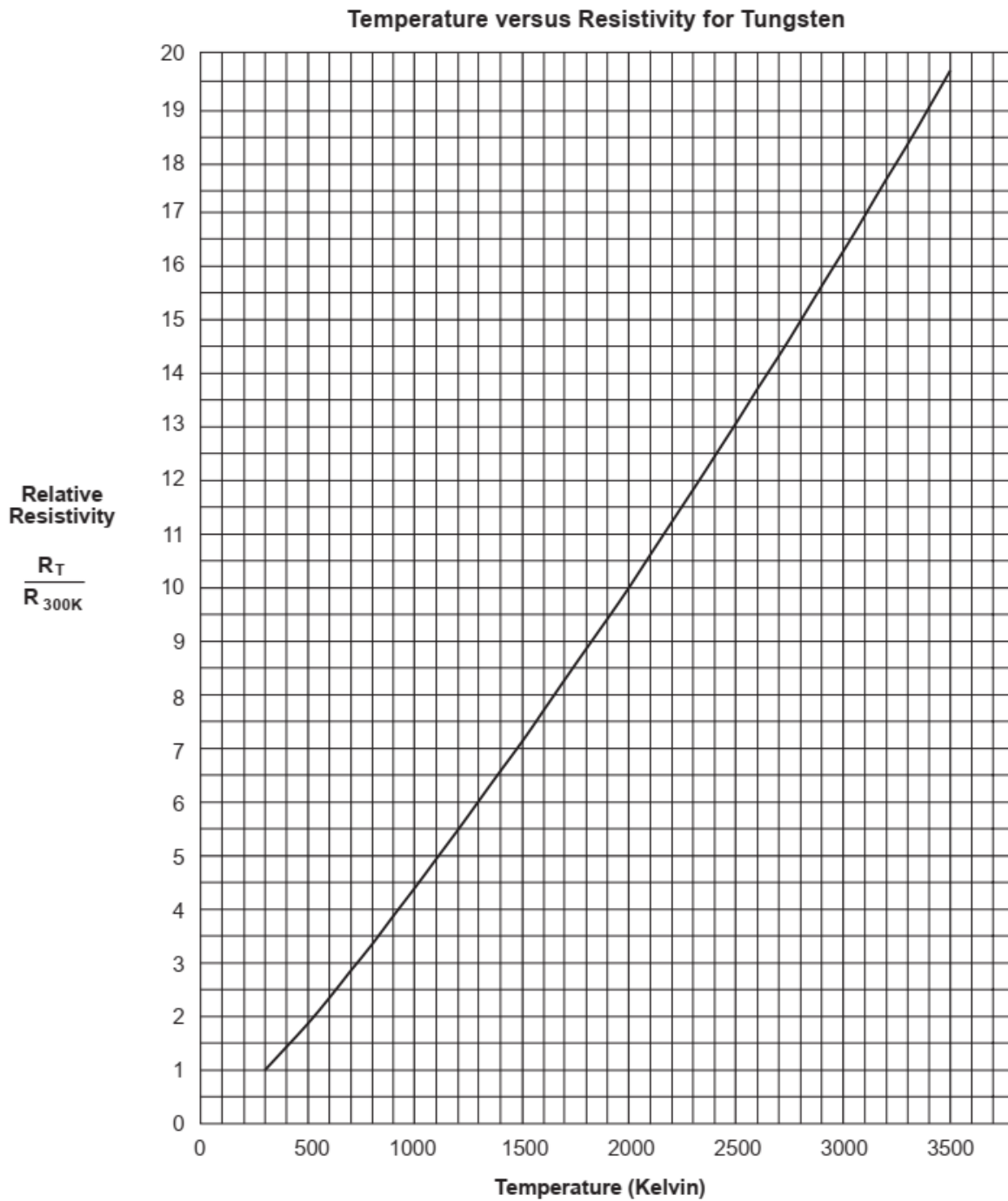
Πίνακας 4.

V (V)	I (A)	Ακτινοβ. (mV)	R ( $\Omega$ )	R/R <sub>ref</sub>	T (K)	T <sup>4</sup> (K <sup>4</sup> )

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Υπολογίστε την αντίσταση του νήματος από την τάση και την ένταση και καταγράψτε τις τιμές στον Πίνακα 4.
2. Βρείτε τον λόγο R/R<sub>ref</sub>.
3. Χρησιμοποιώντας το διάγραμμα του Σχήματος 3 βρείτε την θερμοκρασία του νήματος και υψώστε την στην 4<sup>η</sup> δύναμη.





Σχήμα 3. Θερμοκρασία του νήματος σε σχέση με τον λόγο των αντιστάσεων του νήματος.

4. Σχεδιάστε ένα διάγραμμα ακτινοβολίας- $T^4$  με την ακτινοβολία στον γ-άξονα. Βάλτε το διάγραμμα στο παρακάτω πλαίσιο.

### Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Σύμφωνα με τις μετρήσεις σας, ποια είναι η σχέση μεταξύ ακτινοβολίας και θερμοκρασίας; Ισχύει αυτή η σχέση για όλα τα σημεία που μετρήσατε ή υπάρχουν κάποια που ξεφεύγουν;

2. Η σχέση Stefan-Boltzmann ισχύει για μελανό σώμα, δηλ. ένα σώμα που απορροφά όλη την ακτινοβολία που πέφτει πάνω του. Είναι το νήμα ένα τελείως μελανό σώμα;

3. Ποιες άλλες πηγές ακτινοβολίας είναι πιθανό να έχουν επηρεάσει τα αποτελέσματά σας; Τι επίδραση αναμένετε να έχουν αυτές οι πηγές στις μετρήσεις σας;

### Σκοπός

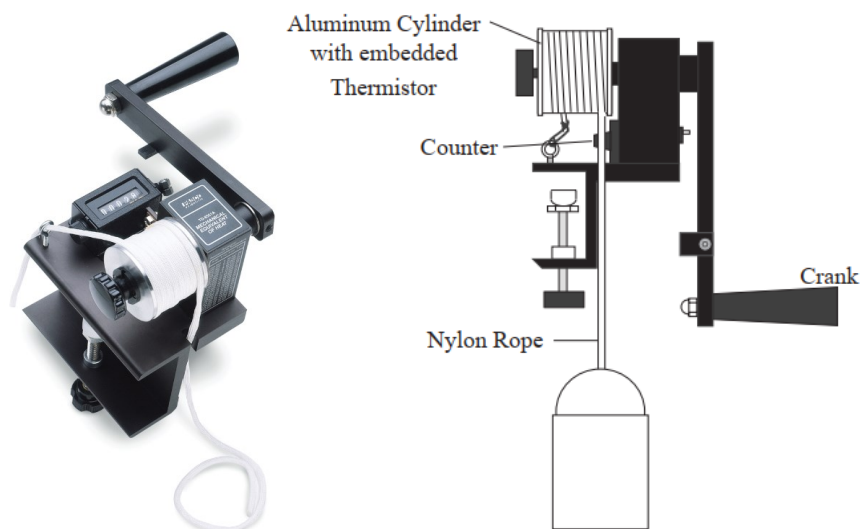
Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί το ποσό θερμότητας που παράγεται από τριβή και να συγκριθεί με το έργο που δαπανήθηκε για να την υπερνικήση της τριβής.

### Περιγραφή

Η αρχή διατήρησης της ενέργειας λέει ότι αν ένα ποσό έργου μετατραπεί πλήρως σε θερμότητα, η θερμική ενέργεια ισούται με το έργο που δαπανήθηκε. Όμως, αν το έργο μετρηθεί σε Joules και η θερμική ενέργεια σε θερμίδες (Calories), η ισοδυναμία δεν είναι εκ πρώτης εμφανής. Χρειάζεται μια σχέση μετατροπής η οποία να εξισώνει τα Joule με τις θερμίδες. Αυτή η σχέση ονομάζεται Μηχανικό Ισοδύναμο της Θερμότητας. Η πειραματική διάταξη του Μηχανικού Ισοδύναμου Θερμότητας επιτρέπει τον ακριβή προσδιορισμό του ισοδύναμου με ακρίβεια 5 %.

Η διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 1. Ένα σχοινί από νάυλον τυλίγεται αρκετές φορές γύρω από τον κύλινδρο ώστε καθώς η μανιβέλα περιστρέφεται να δημιουργεί τριβή μεταξύ του σχοινιού και του κυλίνδρου. Στην άκρη του σχοινιού κρέμεται μία μεγάλη μάζα (ένας κουβάς), το βάρος της οποίας είναι μία σταθερή δύναμη. Άρα και η τριβή θα είναι σταθερή, με την προϋπόθεση ότι ο κουβάς παραμένει στο ίδιο ύψος. Το έργο που παράγει ο χειριστής που περιστρέφει την μανιβέλα θα είναι ακριβώς όσο χρειάζεται για την υπερνίκηση της τριβής και είναι μετρήσιμο.

Καθώς ο κύλινδρος περιστρέφεται, η τριβή μεταξύ του κυλίνδρου και του σχοινιού μετατρέπει το έργο σε θερμότητα η οποία καταλήγει στον κύλινδρο και αυξάνει την θερμοκρασία του. Ένα θερμίστορ είναι ενσωματωμένο στον κύλινδρο έτσι ώστε μετρώντας την αντίσταση του θερμίστορ, να μπορεί να προσδιοριστεί η θερμοκρασία του κυλίνδρου. Παρατηρώντας την μεταβολή της θερμοκρασίας του κυλίνδρου, μπορεί να υπολογιστεί η θερμότητα που μεταφέρθηκε στον κύλινδρο. Τέλος, ο λόγος έργου προς θερμότητα καθορίζει το μηχανικό ισοδύναμο της θερμότητας,  $J$ .

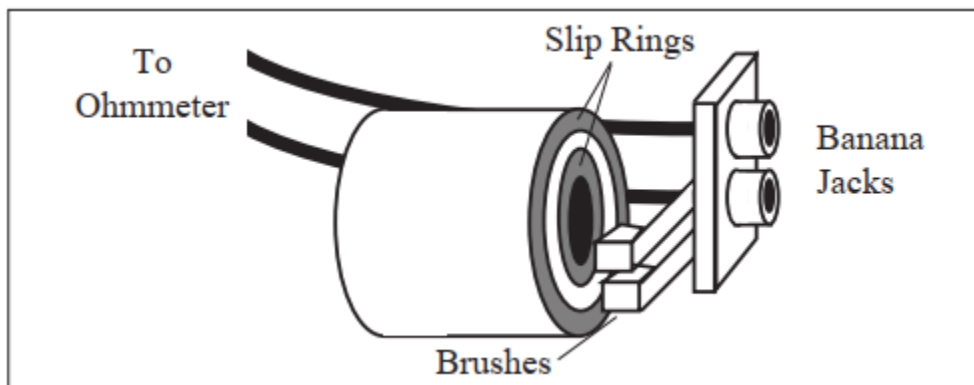


Σχήμα 1. Πειραματική διάταξη για την μέτρηση του μηχανικού ισοδύναμου της θερμότητας.

## Θεωρητικό υπόβαθρο

Για να μετρηθεί η θερμοκρασία του αλουμινένιου κυλίνδρου, ένα θερμίστορ είναι ενσωματωμένο μέσα του. Το θερμίστορ είναι ένας αντιστάτης που εξαρτάται από την θερμοκρασία. Αν η αντίσταση του θερμίστορ είναι γνωστή, η θερμοκρασία του μπορεί να προσδιοριστεί με μεγάλη ακρίβεια και αξιοπιστία. Οι ακροδέκτες του θερμίστορ μέσα στον κύλινδρο είναι κολλημένοι με καλάι στους χάλκινους δακτυλίους ολίσθησης (slip rings) (Σχήμα 2) στην βάση του κυλίνδρου. Τα καρβουνάκια (brushes) παρέχουν ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στους χάλκινους δακτυλίους και στις υποδοχές των βυσμάτων (banana jacks). Συνδέοντας ένα ωμόμετρο σε αυτές τις δύο υποδοχές, η αντίσταση του θερμίστορ μπορεί να παρακολουθείται και κατ' επέκταση και η θερμοκρασία ακόμα και αν ο κύλινδρος περιστρέφεται.

Παρόλο που η εξάρτηση του θερμίστορ από την θερμοκρασία είναι ακριβής και αξιόπιστη, δεν είναι γραμμική. Θα χρειαστεί λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ο πίνακας που είναι κολλημένος πάνω στην διάταξη ο οποίος αντιστοιχεί αντίσταση σε θερμοκρασία (Σχήμα 4).



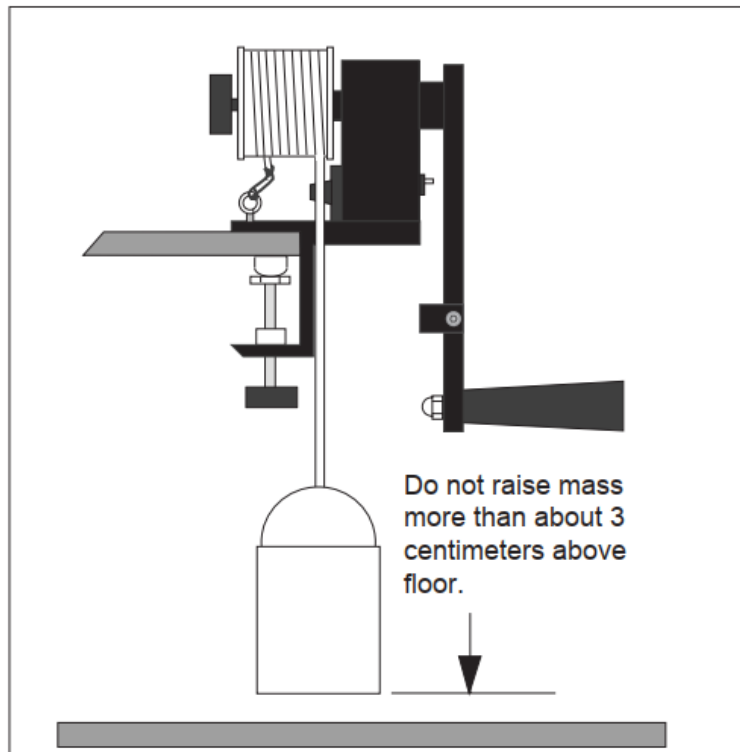
Σχήμα 2. Η διάταξη για την μέτρηση της αντίστασης του κυλίνδρου.

## Ρυθμίσεις

Καταγράψτε τις μετρήσεις στον Πίνακα 1.

1. Πριν ξεκινήσετε το πείραμα, καλύψτε την παράπλευρη επιφάνεια του κυλίνδρου με σκόνη γραφίτη (στο σωληνάριο). Ο γραφίτης μειώνει την τριβή οπότε από την μία μειώνεται η φθορά του κυλίνδρου και από την άλλη η ροπή γίνεται ομαλή και σταθερή.
2. Στερεώστε την διάταξη του μηχανικού ισοδύναμου θερμότητας στο τραπέζι και σφίξτε πολύ καλά τον σφιγκτήρα.

3. Όταν περιστρέφετε την μανιβέλα, ο κουβάς δεν πρέπει να σηκώνεται παραπάνω από 3 εκατοστά από το έδαφος (Σχήμα 3). Αλλιώς υπάρχει σοβαρός κίνδυνος τραυματισμού και κοψίματος του σχοινιού.



Σχήμα 3. Ο κουβάς δεν θα πρέπει να σηκωθεί παραπάνω από 3 εκατοστά από το έδαφος.

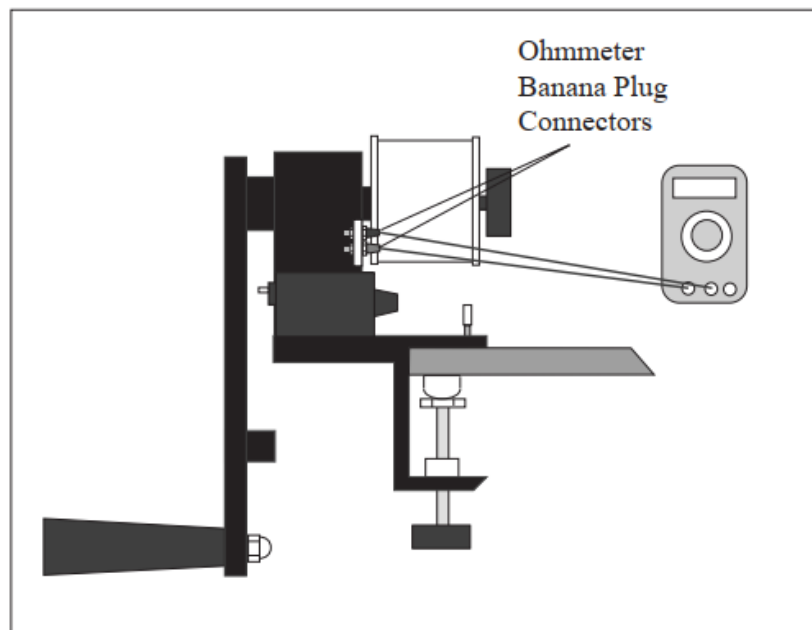
4. Τοποθετήστε τον κύλινδρο στο ψυγείο για αρκετές ώρες ώστε να πέσει η θερμοκρασία του τουλάχιστον  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  παρακάτω από την θερμοκρασία δωματίου. Ο κύλινδρος είναι κρύος όταν ξεκινάει το πείραμα και ζεστός όταν τελειώνει. Η μέση του θερμοκρασία λοιπόν πρέπει να είναι όση και του δωματίου. Κατά αυτόν τον τρόπο στο πρώτο μισό του πειράματος θερμότητα μεταφέρεται από το περιβάλλον στον κύλινδρο. Στο δεύτερο μισό θερμότητα μεταφέρεται από τον κύλινδρο στο περιβάλλον. Αν η μέση θερμοκρασία του κυλίνδρου είναι όση και του δωματίου, τότε αυτές οι δύο θερμότητες θα πρέπει να είναι σχεδόν ίσες οπότε να αλληλοεξουδετερώνονται και δεν επηρεάζουν τις μετρήσεις μας.
5. Υπολογίστε τις επιθυμητές θερμοκρασίες στην αρχή και στο τέλος του πειράματος με βάση την θερμοκρασία δωματίου. Ιδανικά, το πείραμα θα πρέπει να ξεκινήσει με τον κύλινδρο να έχει θερμοκρασία περίπου  $7-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  μικρότερη από του δωματίου και να σταματήσει όταν θα έχει  $7-9\text{ }^{\circ}\text{C}$  μεγαλύτερη θερμοκρασία από του δωματίου.
6. Χρησιμοποιώντας τον πίνακα που είναι κολλημένος στην διάταξη (Σχήμα 4) καθορίστε την τιμή της αντίστασης που αντιστοιχεί στις δύο θερμοκρασίες που βρήκατε προηγουμένως. Επίσης, βρείτε την αντίσταση που αντιστοιχεί σε  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  λιγότερο από την τελική θερμοκρασία. Όταν φτάσετε  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  πριν την τελική θερμοκρασία θα περιστρέφετε την μανιβέλα αργά. Αυτό διότι αν συνεχίσετε να περιστρέφετε γρήγορα, η θερμοκρασία θα ξεπεράσει την τελική που είχατε θέσει σαν στόχο ακόμα και αν έχετε σταματήσει να περιστρέφετε την μανιβέλα.

Thermistor:  
Resistance vs. Temperature

R ( $\Omega$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	R ( $\Omega$ )	T ( $^{\circ}\text{C}$ )
269,080	5	95,447	26
255,380	6	91,126	27
242,460	7	87,022	28
230,260	8	83,124	29
218,730	9	79,422	30
207,850	10	75,903	31
197,560	11	72,560	32
187,840	12	69,380	33
178,650	13	66,356	34
169,950	14	63,480	35
161,730	15	60,743	36
153,950	16	58,138	37
146,580	17	55,658	38
139,610	18	53,297	39
133,000	19	51,048	40
126,740	20	48,905	41
120,810	21	46,863	42
115,190	22	44,917	43
109,850	23	43,062	44
104,800	24	41,292	45
100,000	25	39,605	46

Σχήμα 4. Αντιστοίχιση αντίστασης με θερμοκρασία σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

7. Όταν ο κύλινδρος είναι αρκετά κρύος, σύρετέ τον στον άξονα. Οι χάλκινοι δακτύλιοι θα πρέπει να βρίσκονται προς την μανιβέλα. Βεβαιωθείτε επίσης ότι ο πείρος που έχει ο άξονας «κουμπώνει» στις εγκοπές του κυλίνδρου. Σφίξτε την βίδα με την μαύρη λαβή.
8. Συνδέστε τα βύσματα του ωμόμετρου στις υποδοχές της διάταξης όπως φαίνεται στο Σχήμα 5. Ρυθμίστε το ωμόμετρο σε κλίμακα αντίστοιχη με την τάξη μεγέθους των  $\Omega$  που θα μετρήσετε.



Σχήμα 5. Σύνδεση ωμομέτρου.

9. Τυλίξτε το σχοινί περίπου 6 φορές γύρω από τον κύλινδρο. Βεβαιωθείτε ότι το πλατύ μέρος του σχοινιού είναι σε επαφή με τον κύλινδρο και ότι το σχοινί περνάει από την εγκοπή που υπάρχει στην διάταξη καθώς πηγαίνει προς τον κουβά. Δέστε την μία άκρη του σχοινιού στον κρίκο που υπάρχει πάνω στην διάταξη και την άλλη άκρη στον κουβά. Αφού ολοκληρώσετε το δέσιμο, ο κουβάς θα πρέπει ίσα που να σηκώνεται από το έδαφος.
10. Μηδενίστε τον μετρητή περιστροφών.

## Εκτέλεση της άσκησης

Καταγράψτε τις μετρήσεις στον Πίνακα 1.

1. Παρατηρήστε το ωμόμετρο. Μόλις η αντίσταση φτάσει στην προκαθορισμένη τιμή, ξεκινήστε να περιστρέφετε γρήγορα την μανιβέλα σύμφωνα με την φορά του ρολογιού. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει έναν βαθμό πριν από την προκαθορισμένη τελική θερμοκρασία, συνεχίστε την περιστροφή αλλά αργά. Μόλις η θερμοκρασία φτάσει την τελική τιμή, σταματήστε την περιστροφή. Παρακολουθείστε το ωμόμετρο μέχρι να μην αλλάζει άλλο η ένδειξή του. Καταγράψτε αυτήν την ένδειξη.
2. Καταγράψτε τον αριθμό περιστροφών,  $N$ , της μανιβέλας.
3. Ζυγίστε τον κύλινδρο και καταγράψτε την μάζα του,  $m$ .
4. Με ένα παχύμετρο μετρήστε την διάμετρο του κυλίνδρου μαζί με το σχοινί. Μετρήστε και το πάχος του σχοινιού.

Πίνακας 1.

Θερμοκρασία δωματίου	(°C)
Θερμοκρασία εκκίνησης	(°C)
1 °C πριν την θερμοκρασία-στόχο τερματισμού	(°C)
Θερμοκρασία-στόχος τερματισμού	(°C)
Θερμοκρασία τερματισμού πραγματική	(°C)
Αντίσταση θερμοκρασίας εκκίνησης	$\Omega$
Αντίσταση 1 °C πριν την θερμοκρασία-στόχο τερματισμού	$\Omega$
Αντίσταση θερμοκρασίας-στόχου τερματισμού	$\Omega$
Αντίσταση θερμοκρασίας τερματισμού πραγματική	$\Omega$
Αριθμός περιστροφών (N)	
Μάζα κυλίνδρου	(kg)
Διάμετρος κυλίνδρου	(m)
Πάχος σχοινιού	(m)
Διάμετρος κυλίνδρου μαζί με το σχοινί	(m)
Μάζα κουβά	(kg)

## Επεξεργασία μετρήσεων

Το έργο που εκτελείται στον κύλινδρο ισούται με την ροπή,  $\tau$ , που ασκείται στον κύλινδρο επί την γωνία  $\theta$ , δηλαδή την συνολική γωνία περιστροφής. Είναι δύσκολο να μετρηθεί απευθείας η ροπή που ασκείται από την μανιβέλα. Ωστόσο, εφόσον η κίνηση του κυλίνδρου είναι περίπου σταθερή, γνωρίζουμε ότι η ροπή που παρέχεται από την μανιβέλα πρέπει ίσα που να αντισταθμίζει την ροπή που δημιουργείται από την τριβή του σχοινιού. Η τελευταία υπολογίζεται εύκολα από την σχέση:

$$\tau = M \cdot g \cdot R$$

όπου  $M$  είναι η μάζα του κουβά,  $g$  είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $R$  είναι η ακτίνα του κυλίνδρου+το σχοινί. Κάθε φορά που η μανιβέλα κάνει μία πλήρη περιστροφή αυτή η ροπή ασκείται στον κύλινδρο επί μια γωνία  $2\pi$ . Το συνολικό έργο που εκτελείται είναι:

$$W = \tau \cdot \theta = M \cdot g \cdot R \cdot (2\pi N)$$

W = ...

Η θερμότητα,  $Q$ , που παράγεται από την τριβή πάνω στον αλουμινένιο κύλινδρο μπορεί να προσδιοριστεί από την μετρημένη μεταβολή της θερμοκρασίας. Οπότε:

$$Q = m \cdot c \cdot (T_f - T_i)$$

όπου  $m$  είναι η μάζα του κυλίνδρου,

$c$  είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του αλουμινίου ( $0.220 \text{ cal / (g} \cdot \text{°C)}$ )

$T_f$  είναι η τελική θερμοκρασία του κυλίνδρου (αυτή που τελικά έφτασε, όχι αυτή που είχατε προκαθορίσει (στόχος))

$T_i$  είναι η θερμοκρασία του κυλίνδρου πριν ξεκινήσετε τις περιστροφές της μανιβέλας.

Q = ...

Ο λόγος του έργου που δαπανήθηκε προς την θερμότητα που παράχθηκε,  $J$ , θα είναι:

$$J = W / Q$$

J = ...

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Συγκρίνετε την τιμή που υπολογίσατε για τον  $J$  με την τιμή που υπάρχει στην βιβλιογραφία.



2. Συζητήστε πηγές σφάλματος που νομίζετε ότι έχουν επηρεάσει τα αποτελέσματά σας. Θα μπορούσαν κάποια από αυτά να είχαν αποφευχθεί; Τι επίδραση έχουν στην τιμή του  $J$  που υπολογίσατε; Μπορείτε να προσδιορίσετε την τάξη μεγέθους αυτής της επίδρασης;

3. Είναι πειραματικά εφικτό η θερμότητα που απορρόφησε ο κύλινδρος να είναι μεγαλύτερη από το έργο που ασκήθηκε πάνω του; Εξηγήστε.

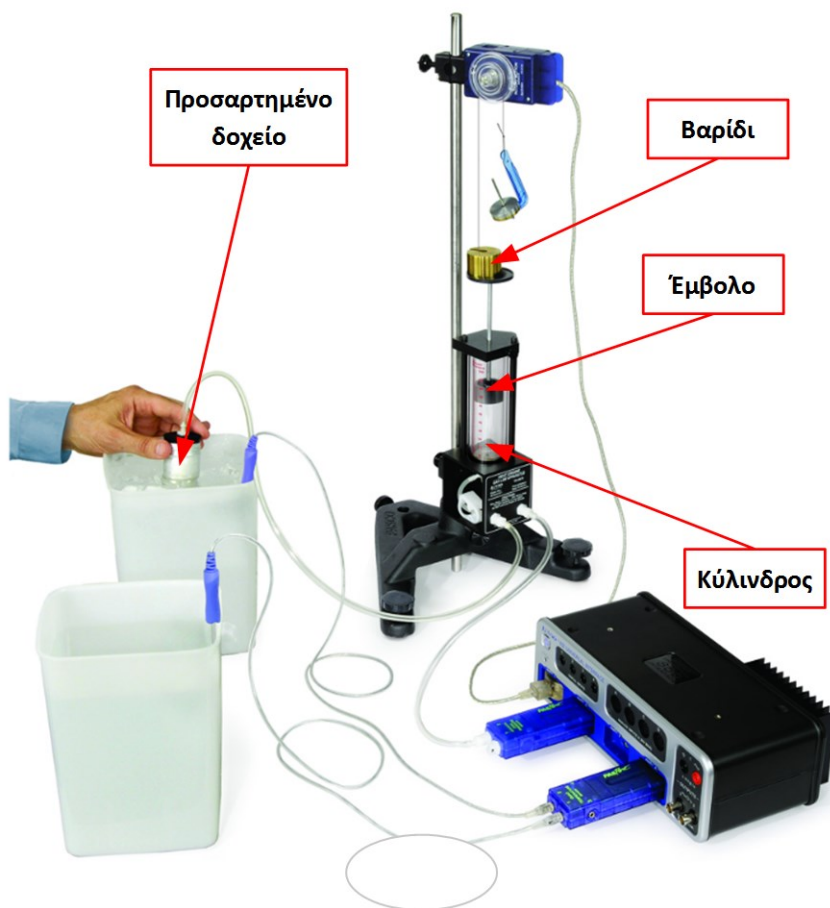
4. Μπορεί η τιμή του  $J$  που βρήκατε να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστεί πόση μηχανική ενέργεια μπορεί να παραχθεί από ένα καθορισμένο ποσό θερμικής ενέργειας; Γιατί ή γιατί όχι;

### Σκοπός

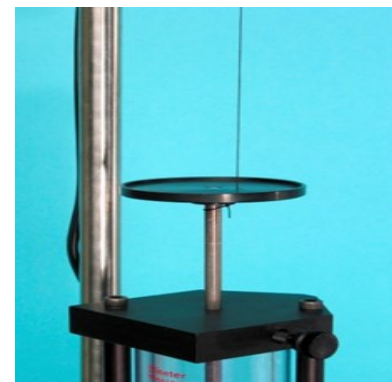
Ο σκοπός αυτής της άσκησης είναι να προσδιοριστεί το έργο που παράγει μια θερμική μηχανή και οι θερμότητες που ανταλλάσσει με το περιβάλλον.

### Περιγραφή

Μια θερμική μηχανή είναι μια συσκευή/διάταξη που λειτουργεί απορροφώντας θερμότητα από μια θερμή δεξαμενή, μετατρέπει μέρος αυτής σε μηχανική ενέργεια και στην συνέχεια, αποβάλλει την υπόλοιπη θερμότητα σε μια ψυχρή δεξαμενή. Σε αυτό το πείραμα, η θερμική μηχανή αποτελείται από αέρα μέσα σε έναν κύλινδρο ο οποίος εκτονώνεται όταν το προσαρτημένο δοχείο βυθίζεται σε ζεστό νερό (Σχήμα 1). Ο αέρας που εκτονώνεται σπρώχνει ένα έμβολο και παράγει έργο ανυψώνοντας ένα βάρος. Ο κύκλος της θερμικής μηχανής ολοκληρώνεται με την βύθιση του δοχείου στο κρύο νερό, όπου η πίεση και ο όγκος επανέρχονται στις αρχικές τους τιμές.



Σχήμα 1. Διάταξη θερμικής μηχανής.



Σχήμα 2. Δέσιμο νήματος.

## Θεωρητικό υπόβαθρο

Η θεωρητική μέγιστη απόδοση μιας θερμικής μηχανής εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία της θερμής δεξαμενής,  $T_H$  και την θερμοκρασία της ψυχρής δεξαμενής,  $T_C$ . Η μέγιστη απόδοση δίνεται από:

$$e = \left(1 - \frac{T_C}{T_H}\right) \times 100\% \quad (1)$$

Η πραγματική απόδοση ορίζεται ως:

$$e = \frac{W}{Q_H} \times 100\% \quad (2)$$

όπου  $W$  είναι το έργο που παράγεται από την θερμική μηχανή και  $Q_H$  είναι η θερμότητα που απορροφάται από την θερμή δεξαμενή.

Στην αρχή του κύκλου, το αέριο διατηρείται σε σταθερή θερμοκρασία ενώ ένα βάρος τοποθετείται πάνω από το έμβολο. Έργο καταναλώνεται από το αέριο και θερμότητα απορρίπτεται στην ψυχρή δεξαμενή. Η εσωτερική ενέργεια του αερίου,

$$\Delta U = nC_V\Delta T \quad (3)$$

δεν αλλάζει αφού η θερμοκρασία δεν αλλάζει. Σύμφωνα με τον 1<sup>ο</sup> Νόμο της Θερμοδυναμικής,

$$\Delta U = Q - W \quad (4)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα που απορρίπτεται από το αέριο και  $W$  είναι το έργο που καταναλώνεται από το αέριο.

Στο δεύτερο μέρος του κύκλου, προστίθεται θερμότητα στο αέριο αναγκάζοντας το να εκτονωθεί, ωθώντας το έμβολο προς τα πάνω με αποτέλεσμα να έχουμε ανύψωση του βάρους. Αυτή η μεταβολή λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση (ατμοσφαιρική πίεση) επειδή το έμβολο είναι ελεύθερο να κινηθεί. Για μια ισοβαρή μεταβολή, η θερμότητα που συναλλάσσεται μεταξύ αερίου και δεξαμενής είναι:

$$Q_P = nC_P\Delta T \quad (5)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των γραμμομορίων του αερίου στο δοχείο,  $C_P$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα για σταθερή πίεση και  $\Delta T$  είναι η αλλαγή της θερμοκρασίας. Το έργο που παράγεται από το αέριο βρίσκεται χρησιμοποιώντας τον 1<sup>ο</sup> Νόμο της Θερμοδυναμικής,

$$W = Q - \Delta U \quad (6)$$

όπου  $Q$  είναι η θερμότητα που προστίθεται στο αέριο και  $\Delta U$  είναι η αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια του αερίου, που δίνεται από:

$$\Delta U = nC_V\Delta T \quad (7)$$

όπου  $C_V$  είναι η γραμμομοριακή θερμοχωρητικότητα για σταθερό όγκο.

Δεδομένου ότι ο αέρας αποτελείται κυρίως από διατομικά μόρια

$$C_V = \frac{5}{2}R \quad (8)$$

και

$$C_P = \frac{7}{2}R \quad (9)$$

Στο τρίτο μέρος του κύκλου, το βάρος αφαιρείται από το έμβολο ενώ το αέριο διατηρείται στην υψηλότερη θερμοκρασία. Θερμότητα προστίθεται στο αέριο και το αέριο εκτονώνεται, παράγοντας έργο. Κατά την διάρκεια αυτής της ισοθερμικής μεταβολής, το έργο δίνεται από:

$$W = nRT \ln\left(\frac{V_f}{V_i}\right) \quad (10)$$

όπου  $V_i$  είναι ο αρχικός όγκος στην αρχή της ισοθερμικής μεταβολής και  $V_f$  είναι ο τελικός όγκος στο τέλος της ισοθερμικής μεταβολής. Δεδομένου ότι η αλλαγή στην εσωτερική ενέργεια είναι μηδενική για μια ισοθερμική μεταβολή, ο 1<sup>ος</sup> Νόμος της Θερμοδυναμικής υποδεικνύει ότι η θερμότητα που προστίθεται στο αέριο είναι ίση με το έργο που παράγει το αέριο:

$$\Delta U = Q - W \quad (11)$$

Στο τελευταίο μέρος του κύκλου, θερμότητα απορρίπτεται από το αέριο στην ψυχρή δεξαμενή και το έμβολο επιστρέφει στην αρχική του θέση. Αυτή η μεταβολή είναι ισοβαρής και ισχύουν οι ίδιες εξισώσεις όπως στο δεύτερο μέρος του κύκλου.

## Ρυθμίσεις

1. Βάλτε την ράβδο στην βάση της. Συνδέστε την θερμική μηχανή στην ράβδο. Η θερμική μηχανή πρέπει να είναι προσανατολισμένη έτσι ώστε το άκρο του εμβόλου να είναι προς τα πάνω και η θερμική μηχανή πρέπει να είναι τοποθετημένη κοντά στο κάτω μέρος της βάσης (Σχήμα 1).
2. Συνδέστε τον αισθητήρα περιστροφικής κίνησης (Rotary Motion Sensor) στην κορυφή της ράβδου και ευθυγραμμίστε την μεσαία αυλάκωση της διάφανης τροχαλίας ώστε το νήμα που θα περνάει από την

τροχαλία να βρίσκεται ακριβώς πάνω από το κέντρο της μαύρης πλατφόρμας που είναι συνδεδεμένη με το έμβολο.

3. Δέστε το ένα άκρο του νήματος στην ειδική θέση που υπάρχει στο πάνω μέρος της μαύρης πλατφόρμας (Σχήμα 2). Περάστε το άλλο άκρο του νήματος από το μεσαίο βήμα της διάφανης τροχαλίας και συνδέστε την κρεμάστρα. Η συνολική μάζα της κρεμάστρας θα πρέπει να είναι 35 γραμμάρια. Αυτή η μάζα λειτουργεί ως αντίβαρο για το έμβολο.
4. Τοποθετήστε το έμβολο περίπου 2 ή 3 cm ψηλότερα από το κάτω μέρος του κυλίνδρου και συνδέστε το σωληνάκι από το προσαρτημένο δοχείο σε μια θύρα της θερμικής μηχανής και συνδέστε το σωληνάκι από τον αισθητήρα πίεσης στην άλλη θύρα της θερμικής μηχανής.
5. Συνδέστε τον αισθητήρα περιστροφικής κίνησης και τον αισθητήρα πίεσης στα κανάλια εισόδου της συσκευής PASPORT 850. Συνδέστε μέσω bluetooth δύο ακόμα αισθητήρες θερμοκρασίας. Τοποθετείστε το μεταλλικό στέλεχος του ενός αισθητήρα θερμοκρασίας μέσα στην ψυχρή δεξαμενή και το μεταλλικό στέλεχος του άλλου αισθητήρα στην θερμή δεξαμενή.
6. (Λάβετε υπόψη ότι οι αισθητήρες θερμοκρασίας φέρουν την ένδειξη ζεστό και κρύο στο λογισμικό, οπότε θα πρέπει να προσέξετε ποιος αισθητήρας είναι στο ζεστό και ποιος στο κρύο νερό.)
7. Βάλτε ζεστό νερό (περίπου 80 °C) σε ένα από τα πλαστικά δοχεία (περίπου μέχρι την μέση). Βάλτε νερό με πάγο στο άλλο πλαστικό δοχείο. Τα μεγάλα αυτά πλαστικά δοχεία (περίπου 3 λίτρων) διατηρούν τις θερμοκρασίες ζεστού και κρύου σταθερές κατά την διάρκεια του κύκλου της θερμικής μηχανής.

## Εκτέλεση

1. Εκτελέστε το πείραμα χωρίς καθυστέρηση μεταξύ των βημάτων. Μπορεί να θέλετε να εξασκηθείτε μερικές φορές πριν από την εγγραφή μιας εκτέλεσης δεδομένων. Ξεκινήστε με το προσαρτημένο δοχείο στην ψυχρή δεξαμενή. Αυτό το σημείο εκκίνησης θα ονομάζεται σημείο A. Καταγράψτε το ύψος του κάτω μέρους του εμβόλου. Ξεκινήστε την εγγραφή δεδομένων στον υπολογιστή.  
  
A → B: Τοποθετήστε το βαρίδι (200 g) στην πλατφόρμα.  
B → C: Μεταφέρετε το προσαρτημένο δοχείο από την ψυχρή δεξαμενή στην θερμή.  
C → D: Αφαιρέστε το βαρίδι από την πλατφόρμα.  
D → A: Μεταφέρετε το προσαρτημένο δοχείο από την θερμή δεξαμενή στην ψυχρή.
2. Πριν ξεκινήσετε την εγγραφή, αφού βάλετε το προσαρτημένο δοχείο στην ψυχρή δεξαμενή και αφού το αφήσετε να ισορροπήσει, καταγράψτε τη θέση του κάτω μέρους του εμβόλου στον κύλινδρο. Τοποθετήστε αυτήν τη θέση στο αντίστοιχο πεδίο της οθόνης.
3. Όταν ολοκληρωθεί η λήψη του κύκλου, βρείτε το εμβαδό του κλειστού κύκλου χρησιμοποιώντας το εργαλείο 'Area Tool' πάνω στην γραφική παράσταση.

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Ονομάστε τις τέσσερις γωνίες του γραφήματός σας ως A, B, C και D. Προσδιορίστε τις θερμοκρασίες στα σημεία A, B, C και D. Βάλτε βέλη στον κύκλο για να δείξετε την φορά της μεταβολής. Ονομάστε την θερμοκρασία σε κάθε ένα από αυτά τα σημεία.
2. Προσδιορίστε τα είδη των μεταβολών (δηλ. ισοθερμική, ισοβαρής κ.λπ.) και την πραγματική φυσική διαδικασία (τοποθέτηση βαριδίου, εμβάπτιση στην θερμή δεξαμενή, κ.λπ.) για A έως B, B έως C, C έως D και D έως A.

A → B:

B → C:

C → D:

D → A:

3. Αναγνωρίστε και ονομάστε τις δύο μεταβολές κατά τις οποίες το αέριο απορροφά θερμότητα.

4. Υπολογίστε την ιδανική (μέγιστη) απόδοση για μια θερμική μηχανή που λειτουργεί μεταξύ των δύο θερμοκρασιών χρησιμοποιώντας την Εξ. 1.

5. Για να υπολογίσετε την πραγματική απόδοση χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2, θα χρειαστεί να βρείτε το έργο που πραγματοποιείται από το αέριο και τη θερμότητα που προστίθεται στο αέριο:

**(5A)** Χρησιμοποιώντας την περιοχή εντός του κλειστού βρόγχου, υπολογίστε το έργο που παράγει το αέριο. Να θυμάστε ότι το γράφημα είναι Πίεση–Θέση Εμβόλου, και όχι Πίεση–Όγκο, οπότε θα πρέπει να υπολογίσετε την διατομή του εμβόλου και να μετατρέψετε σε όγκο. Η διάμετρος του εμβόλου αναγράφεται στην ετικέτα της θερμικής μηχανής.

**(5B)** Υπολογίστε την  $Q_H$ , την θερμότητα που προσφέρεται στο αέριο από την θερμή δεξαμενή κατά τη διάρκεια της ισοβαρούς εκτόνωσης από το B στο C και κατά την διάρκεια της ισόθερμης εκτόνωσης από το C στο D. Θα πρέπει να υπολογίσετε τα ακόλουθα:

- Δεν γνωρίζουμε τον αρχικό όγκο,  $V_A$ , αλλά μπορούμε να τον υπολογίσουμε μετρώντας τον όγκο του προσαρτημένου δοχείου και προσθέτοντας τον αρχικό όγκο αέρα στον κύλινδρο. Θα αγνοήσουμε τον όγκο στους σωλήνες.

$$V = (\pi r^2 h)_{can} + (Ah_o)_{cylinder} \quad (12)$$

όπου  $A$  είναι η διατομή του εμβόλου.

- Υπολογίστε τον  $V_D$  χρησιμοποιώντας τον νόμο του ιδανικού αερίου για μια ισοβαρή μεταβολή:

$$\frac{V_A}{T_A} = \frac{V_D}{T_D} \quad (13)$$

- Υπολογίστε τον  $V_C$  χρησιμοποιώντας τον νόμο του ιδανικού αερίου για μια ισόθερμη μεταβολή:

$$P_C V_C = P_D V_D \quad (14)$$

- Υπολογίστε την  $Q_{C \rightarrow D}$ . Για μία ισόθερμη μεταβολή,  $Q = n \cdot R \cdot T \cdot \ln(V_f / V_i)$  και από  $P \cdot V = n \cdot R \cdot T$ ,

$$Q_{C \rightarrow D} = P_D \cdot V_D \cdot \ln(V_D / V_C) \quad (15)$$

- Υπολογίστε  $Q_{B \rightarrow C}$ . Για ισοβαρή,  $Q_p = n \cdot C_p \cdot \Delta T$  και δεδομένου ότι ο αέρας είναι ένα διατομικό αέριο  $C_p = 5/2 \cdot R$  και  $n \cdot R = P \cdot V / T$ ,

$$Q_{B \rightarrow C} = \left(\frac{7}{2}\right) \frac{P_D V_D}{T_D} (T_C - T_B) \quad (16)$$

- Υπολογίστε την  $Q_B$

$$Q_H = Q_{B \rightarrow C} + Q_{C \rightarrow D} \quad (17)$$

**(5C)** Υπολογίστε την πραγματική απόδοση χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 2.

6. Να συγκρίνεται την πραγματική απόδοση με την ιδανική απόδοση;

7. Υπολογίστε το πραγματικό έργο που εκτελέστηκε στην μάζα των 200 g χρησιμοποιώντας την σχέση  $W = m \cdot g \cdot h$ . Προσέξτε να χρησιμοποιήσετε μόνο την αλλαγή του ύψους της μάζας. Πώς αυτό συγκρίνεται με το έργο που εκτελέστηκε από το αέριο που υπολογίστηκε στο μέρος 5; Παράγει το αέριο και κάποιο άλλο έργο εκτός από εκείνο για την ανύψωση της μάζας των 200 g;



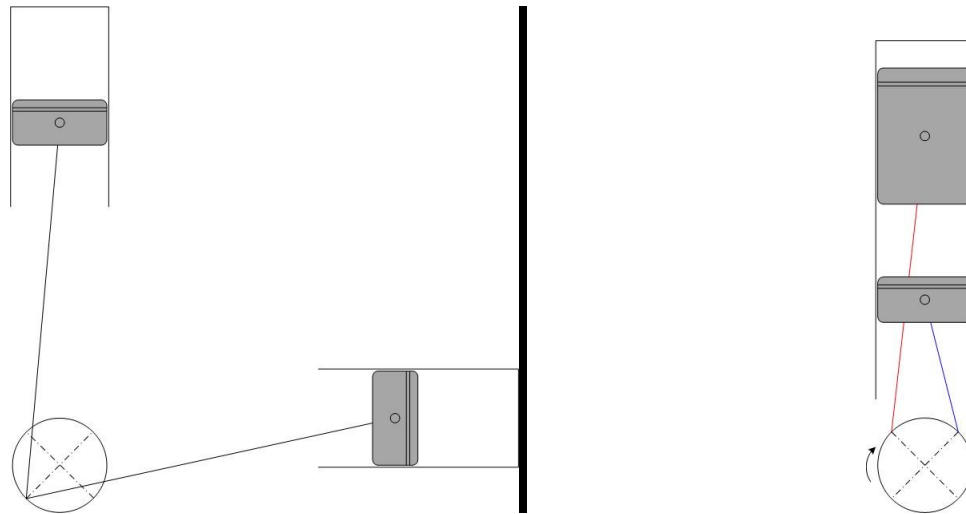
## Επιπλέον διερεύνηση

Αναμείξτε κρύο με λίγο ζεστό νερό και το αντίστροφο ώστε οι δύο δεξαμενές να αποκτήσουν κοντινές θερμοκρασίες. Πραγματοποιήστε τον κύκλο ξανά. Πόσο ψηλά ανεβαίνει τώρα το βαρίδι; Ποια είναι η θεωρητική απόδοση με τις νέες θερμοκρασίες των δεξαμενών;

## A. Σύντομη περιγραφή.

Η μηχανή Stirling είναι μια (συνήθως εμβολοφόρος) θερμική μηχανή μέσα στην οποία μετακινείται συγκεκριμένη ποσότητα αερίου από μια θερμή περιοχή σε μια ψυχρή και το αντίστροφο. Εφευρέθηκε το 1816 από τον Robert Stirling. Το αέριο μετακινείται στην θερμή περιοχή όπου αυξάνεται η πίεσή του και παράγεται έργο. Στην συνέχεια εκτοπίζεται προς την ψυχρή περιοχή, όπου συμπιέζεται σε χαμηλή θερμοκρασία και αποβάλλει θερμότητα. Πηγή ενέργειας της μηχανής είναι θερμότητα που προσδίδεται στο θερμό μέρος από εξωτερική πηγή.

Ανήκει στην κατηγορία των μηχανών κλειστού κύκλου όσον αφορά την μάζα. Αυτό σημαίνει πως η διάταξη λειτουργεί συνεχώς με το ίδιο αέριο. Μπορεί να λειτουργήσει σαν εργοπαραγωγός (κινητήρας), σαν ψυκτική μηχανή ή σαν αντλία θερμότητας. Μια μηχανή Stirling μπορεί θεωρητικά να φτάσει την απόδοση μιας μηχανής Carnot.

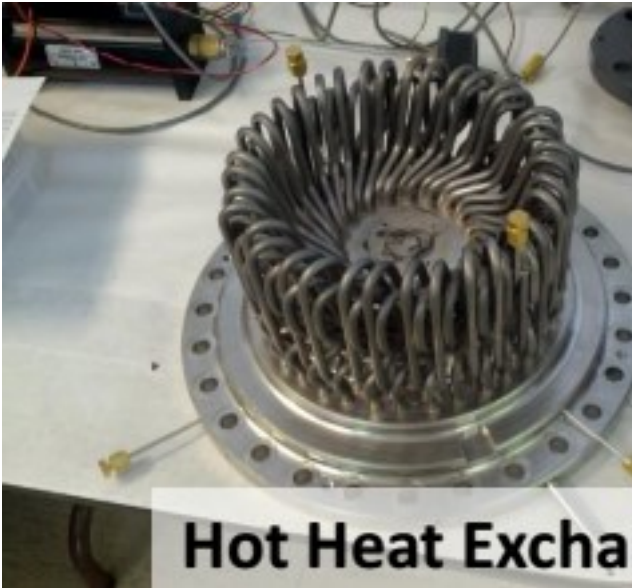


Σχήμα 1. Διαμόρφωση-α (αριστερά) και διαμόρφωση-β (δεξιά) μιας μηχανής Stirling.

## B. Αναλυτική περιγραφή του τρόπου λειτουργίας.

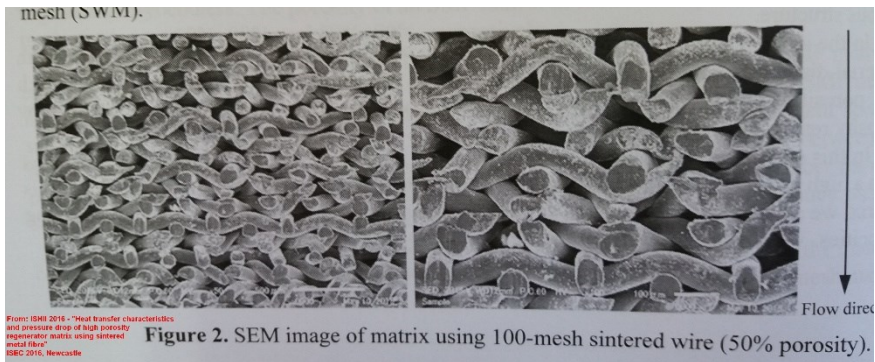
Μια μηχανή Stirling διαθέτει δύο έμβολα που συνδέονται σε έναν κοινό στρόφαλο με μια διαφορά φάσης  $90^\circ$ . Το έμβολο στην θερμή περιοχή ονομάζεται εκτοπιστής και ο ρόλος του είναι να μετακινεί (εκτοπίζει) το αέριο από τον χώρο εκτόνωσης στον χώρο συμπίεσης. Από την άλλη, στον χώρο συμπίεσης το έμβολο ονομάζεται πιστόνι με την έννοια ότι στα άκρα του εμφανίζεται μεγάλη  $\Delta p$  και μικρή  $\Delta T$  (σε διαμόρφωση-α και τα δύο έμβολα είναι πιστόνια). Τα υπόλοιπα μέρη της μηχανής είναι τα εξής:

- Θερμαντήρας (heater -h). Είναι ο ένας από τους τρεις συνολικά εναλλάκτες της μηχανής. Σε αυτόν προσδίδεται θερμότητα από εξωτερική πηγή. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι υδρογονάνθρακες, ραδιενεργά υλικά, ηλιακή ακτινοβολία, βιομάζα, γεωθερμία, ηλεκτρικός αντιστάτης, απορριπτόμενη θερμότητα από βιομηχανίες, κ.τ.λ. Συνήθως αποτελείται από πολλούς σωλήνες σχήματος U μέσα στους οποίους κυκλοφορεί το εργαζόμενο αέριο. Η θερμοκρασία του θερμαντήρα είναι μεγάλη. Για τον λόγο αυτό είναι φτιαγμένος από χάλυβα υψηλής αντοχής.



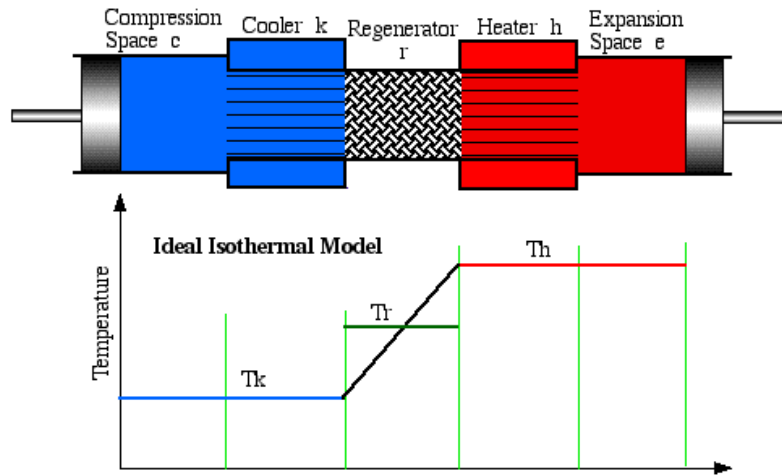
Σχήμα 2. Πραγματικός θερμαντήρας.  
ThermoLift Inc. <http://www.tm-lift.com/>

- Χώρος εκτόνωσης (expansion -e). Είναι ο μεταβλητός χώρος πάνω από την κορώνα του θερμού εμβόλου.
- Αναγεννητής (regenerator -r). Ο αναγεννητής είναι ο εναλλάκτης που απομονώνει θερμικά το θερμό με το ψυχρό τμήμα της μηχανής.



Σχήμα 3. Πάνω: Εικόνα του πλέγματος του αναγεννητή. Κάτω: Ο αναγεννητής σε τμήμα πραγματικής μηχανής (ThermoLift Inc. <http://www.tm-lift.com/>).

- Χώρος συμπίεσης (compression -c). Είναι ο μεταβλητός χώρος πάνω από την κορώνα του ψυχρού πιστονιού.
- Ψύκτης (cooler -k). Είναι ο εναλλάκτης στον οποίο γίνεται απόρριψη θερμότητας. Συχνά, αποτελείται από σωλήνες που τυλίγονται γύρω από τον ψυχρό κύλινδρο. Μέσα τους ρέει νερό ή άλλο ψυκτικό υγρό.



Σχήμα 4. Απλοποιημένη αναπαράσταση των 5 χώρων που αποτελούν την μηχανή Stirling. Επιπλέον φαίνονται οι θερμοκρασίες κάθε χώρου στην περίπτωση της ισοθερμικής θεώρησης.

<http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/me422.html>

### C. Αναγεννητής

Ο ρόλος του αναγεννητή είναι να απορροφά θερμότητα από το θερμό αέριο καθώς αυτό οδεύει προς τον χώρο συμπίεσης, με αποτέλεσμα το αέριο να φτάνει εκεί κρύο. Έτσι μειώνεται το ψυκτικό φορτίο που θα πρέπει να αποβάλλει ο ψύκτης. Στο άλλο μισό του κύκλου, δηλαδή καθώς το αέριο ακολουθεί την αντίστροφη διαδρομή, το ψυχρό πλέον αέριο περνά πάλι μέσα από τον (ήδη ζεστό) αναγεννητή με δύο συνέπειες: α) το αέριο προθερμαίνεται με αποτέλεσμα η θερμότητα που θα πρέπει να δώσει ο θερμαντήρας να είναι μικρότερη και β) ο αναγεννητής ψύχεται οπότε είναι έτοιμος να “υποδεχθεί” το θερμό αέριο του επόμενου κύκλου. Ένας ιδανικός αναγεννητής δίνει στο αέριο όση ακριβώς θερμότητα πήρε. Επομένως, το αέριο εισέρχεται στον αναγεννητή σε κάποια θερμοκρασία (υψηλή αν εισέρχεται από τον χώρο εκτόνωσης, χαμηλή από τον χώρο συμπίεσης), ακολουθεί τις διεργασίες που ορίζονται από την κίνηση των εμβόλων και εξέρχεται με αντίθετη φορά στην ίδια ακριβώς θερμοκρασία (ιδανικά) που εισήλθε.

### D. Νεκροί όγκοι.

Πολύ σημαντικό ρόλο κατά την σχεδίαση της μηχανής παίζουν οι νεκροί όγκοι. Ως νεκρός όγκος ορίζεται ο όγκος κάθε μη μεταβλητού χώρου. Οι μεταβλητοί χώροι μιας μηχανής Stirling είναι μόνο οι χώροι εκτόνωσης και συμπίεσης, εκείνοι δηλαδή που σαρώνονται. Οι όγκοι εναλλακτών, αγωγών και διάκενων είναι οι νεκροί όγκοι. Το πρόβλημα με αυτούς είναι πως μέσα τους δεν μπορεί να γίνει συμπίεση του αερίου. Έτσι μειώνεται η διαφορά μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης πίεσης της μηχανής και κατά συνέπεια και η απόδοση της μηχανής.

### E. Ψυκτικές μηχανές Stirling / Αντλίες Θερμότητας.

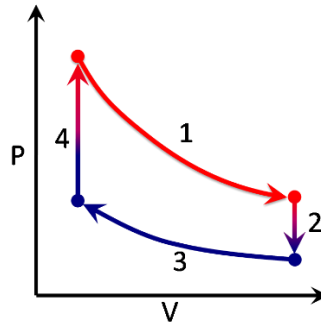
Η πρώτη ψυκτική μηχανή Stirling κατασκευάστηκε από τον Alexander Kirk το 1874. Η ψυκτική Stirling δεν παράγει έργο. Αντίθετα πρέπει να της προσδοθεί. Ο θερμαντήρας συνεχίζει να απορροφά θερμότητα και να την μεταφέρει στο αέριο, ενώ ο ψύκτης συνεχίζει να αποβάλλει θερμότητα. Η διαφορά σε σχέση με τον κινητήρα είναι ότι η θερμοκρασία του ψύκτη είναι μεγαλύτερη από εκείνη του θερμαντήρα. Ο

ψυχόμενος χώρος προσδίδει θερμότητα στον θερμαντήρα, την οποία απορροφά το αέριο καθώς εκτονώνεται. Θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον από τον ψύκτη καθώς το αέριο συμπιέζεται.

Η λειτουργία μιας μηχανής Stirling σαν αντλία θερμότητας είναι ακριβώς ίδια με την ψυκτική μηχανή, με την διαφορά όμως ότι “περιβάλλον” θεωρείται πλέον ο χώρος από τον οποίο απορροφά θερμότητα ο θερμαντήρας και θερμαινόμενος (αντί για ψυχόμενος) χώρος είναι ο χώρος όπου απορρίπτεται θερμότητα από τον ψύκτη.

#### F. Θερμοδυναμικός κύκλος Stirling.

Ιδανικά ο κύκλος Stirling αποτελείται από δύο ισόχωρες και δύο ισόθερμοκρασιακές μεταβολές.



Σχήμα 5. Ο ιδανικός κύκλος Stirling.

[http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)

#### G. Κρυογονικοί ψύκτες Stirling

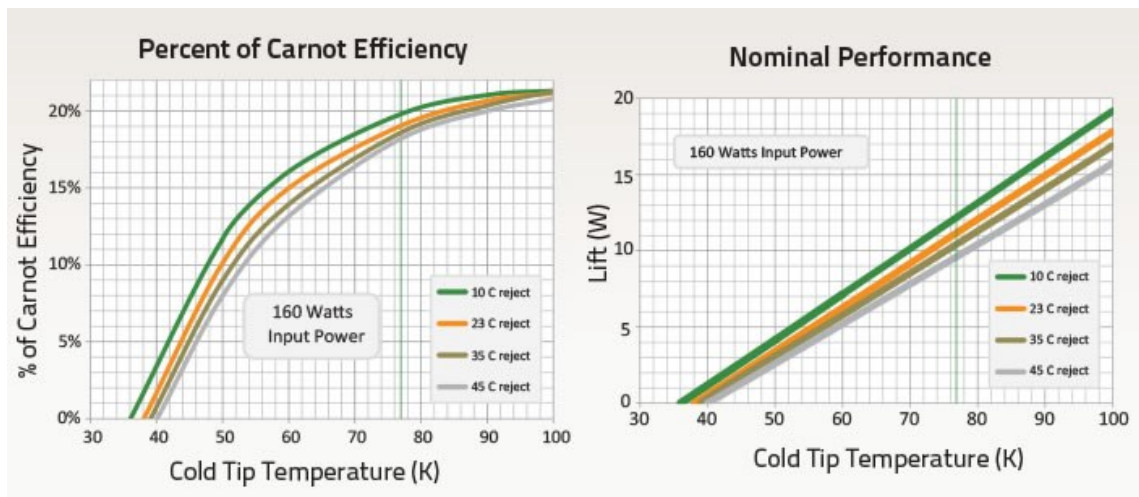
Κρυογονικές θερμοκρασίες θεωρούνται συνήθως οι θερμοκρασίες κάτω από 120 K (θερμοκρασία υγροποίησης του μεθανίου). Οι ψυκτικές μηχανές Stirling που μπορούν να επιτύχουν τέτοιες θερμοκρασίες λέγονται κρυογονικοί ψύκτες Stirling (cryocoolers). Στο εμπόριο κυκλοφορούν από το 1953. Το καταλληλότερο αέριο για αυτές είναι το ήλιο. Χρησιμοποιούνται για υγροποίηση αέρα και αζώτου. Μεγάλη επιτυχία έχουν γνωρίσει οι μικροί κρυογονικοί ψύκτες σε διαστημικές εφαρμογές. Ενδεικτικό είναι το γεγονός πως από το 2002 κρυογονικός ψύκτης της εταιρείας Sunpower βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία στον δορυφόρο RHESSI. Μέχρι το 2018 η Sunpower είχε 82 επιτυχημένες εκτοξεύσεις Stirling cryocoolers.

## 11W Cryocooler



Σχήμα 6. Τεχνικά χαρακτηριστικά του κρυογονικού ψύκτη CryoTel® CT της εταιρείας Sunpower.

<http://sunpowerinc.com/cryocoolers/cryotel-family/ct/>



Σχήμα 7. Απόδοση και ψυκτική ικανότητα του κρυογονικού ψύκτη CryoTel® CT για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. <http://sunpowerinc.com/cryocoolers/cryotel-family/ct/>

Launch Vehicle	Launch Date	Number of Sunpower cryocoolers on Board
Orbital Pegasus XL	2/5/2002	1
Space Shuttle Launch STS-126	11/14/2008	4
Space Shuttle Launch STS-119	3/15/2009	2
Space Shuttle Launch STS-128	8/25/2009	2
Space Shuttle Launch STS-129	11/12/2009	2
Space Shuttle Launch STS-130	2/4/2010	2
Space Shuttle Launch STS-131	4/5/2010	4
Space Shuttle Launch STS-132	5/14/2010	2
Space Shuttle Launch STS-133	2/24/2011	6
Space Shuttle Launch STS-134	5/16/2011	2
Space Shuttle Launch STS-135	7/8/2011	2
Arian2 5ECA	9/21/2011	1
Space X CRS-1 Falcon 9 SPX-1	10/7/2012	2
Space X CRS-2 Falcon 9 SPX-2	3/1/2013	4
EADS Ariane 5, ATV-4	6/5/2013	2
Space X CRS-3 Falcon 9 SPX-3	4/18/2014	4
Space X CRS-4 Falcon 9 SPX-4	9/21/2014	2
Orbital Sciences Cygnus Anteres Rocket	10/28/2014	2
Space X CRS-5 Falcon 9 SPX-5	1/10/2015	4
Space X CRS-6 Falcon 9 SPX-6	4/14/2015	2
Space X CRS-7 Falcon 9 SPX-7	6/29/2015	2
Space X CRS-8 Falcon 9 SPX-8	4/8/2016	3
Space X CRS-9 Falcon 9 SPX-9	7/18/2016	4
Space X CRS-10 Falcon 9 SPX-10	2/19/2017	4
Orbital ATK Atlas V Enhanced Cygnus OA-7	4/18/2017	4
Space X CRS-11 Falcon 9 SPX-11	6/3/2017	2
Space X CRS-12 Falcon 9 SPX-12	8/14/2017	3
Orbital ATK Atlas V Enhanced Cygnus OA-8	11/12/2017	2
Space X CRS-14 Falcon 9 SPX-14	4/2/2018	3
Space X CRS-15 Falcon 9 SPX-15	6/29/2018	2
Space X CRS-14 Falcon 9 SPX-16	12/5/2018	1
POLAR S/N 003	4/2/2018	1
POLAR S/N 008	4/2/2018	1
POLAR S/N 013	4/2/2018	1
POLAR S/N 009	6/29/2018	1
POLAR S/N 011	6/29/2018	1
POLAR S/N 012	12/5/2018	1
		<b>82</b>

Πίνακας 1. Οι διαστημικές αποστολές στις οποίες έχει χρησιμοποιηθεί ο κρυογονικός ψύκτης CF-T της εταιρείας Sunpower μέχρι το 2018.

<https://www.sunpowerinc.com/products/stirling-cryocoolers/cryotel-cryocoolers/spacecryocoolers>

## Θεωρητικό υπόβαθρο

Για μια ισοθερμική μεταβολή, η θερμότητα ισούται με το έργο και δίνεται από την Εξίσωση 1:

$$\Delta Q = W = P_{\alpha\rho\chi} \cdot V_{\alpha\rho\chi} \cdot \ln \left( \frac{V_{\tau\epsilon\lambda}}{V_{\alpha\rho\chi}} \right) \quad (1)$$

Για μια ισόχωρη μεταβολή διατομικού αερίου (π.χ. αέρας όπου  $c_v = \frac{5}{2} \cdot R$ ), η θερμότητα δίνεται από την Εξίσωση 2:

$$\Delta Q = \frac{P_{\alpha\rho\chi} \cdot V_{\alpha\rho\chi}}{T_{\alpha\rho\chi}} \cdot \frac{5}{2} \cdot (T_{\tau\epsilon\lambda} - T_{\alpha\rho\chi}) \quad (2)$$



## Εκτέλεση της άσκησης

1. Υπολογίστε τον νεκρό όγκο μέσα στον κύλινδρο ( $V_0$ ) όταν το έμβολο είναι στην αρχική του θέση (10 mm).



2. Υπολογίστε τον όγκο του αερίου μέσα στο προσαρτημένο δοχείο ( $V_{can}$ ).
3. Υπολογίστε τον συνολικό νεκρό όγκο της μηχανής,  $V_d = V_0 + V_{can} + V_{pipe}$ . Δίνεται ο νεκρός όγκος των σωληνώσεων είναι:  $V_{pipe} = 11.674 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ .
4. Ανοίξτε το αρχείο carstone και με την αριθμομηχανή ορίστε τον νεκρό όγκο της μηχανής,  $V_d$ , σε  $\text{m}^3$ . Έπειτα, δημιουργείτε ένα νέο μέγεθος, τον όγκο του κυλίνδρου σε  $\text{m}^3$ . Αυτό το μέγεθος θα το βάλετε στον χ-άξονα στο διάγραμμα P-V (η πίεση σε Pa).
5. Γεμίστε τα πλαστικά δοχεία, το ένα με πολύ πάγο και λίγο νερό και το άλλο με βραστό νερό.
6. Με την συσκευή και το προσαρτημένο δοχείο σε θερμοκρασία δωματίου, τοποθετείτε το έμβολο στην ένδειξη 10 mm και σφίξτε καλά την βίδα.
7. Συνδέστε τον ταχυσύνδεσμο.
8. Τοποθετείτε το προσαρτημένο δοχείο μέσα στο θερμό δοχείο και περιμένετε λίγα δευτερόλεπτα. Αυτό είναι το σημείο "A" του θερμοδυναμικού κύκλου. Πατήστε το εικονίδιο "Record".
9. Ξεσφίξτε την βίδα κρατώντας ταυτόχρονα το έμβολο ώστε να μην φύγει προς τα πάνω. Με πολύ αργή κίνηση, αφήστε το έμβολο να εκτονωθεί. Η εκτόνωση θα διαρκέσει περίπου 1 λεπτό. Αυτό είναι το σημείο "B".
10. Αφού το έμβολο φτάσει στην ανώτερη θέση του, σφίξτε και πάλι, καλά την βίδα.

11. Τοποθετείστε το προσαρτημένο δοχείο στο παγωμένο νερό. Αυτό είναι το σημείο “C”.
12. Ξεσφίξτε την βίδα κρατώντας ταυτόχρονα το έμβολο ώστε να μην φύγει προς τα κάτω. Με πολύ αργή κίνηση, αφήστε το έμβολο να συμπιεστεί. Η συμπίεση θα διαρκέσει περίπου 1 λεπτό. Το έμβολο θα πρέπει να φτάσει στην αρχική του θέση. Αυτό είναι το σημείο “D”.
13. Σφίξτε την βίδα και ξανα-τοποθετείστε το προσαρτημένο δοχείο στο ζεστό νερό, ώστε να κλείσει ο κύκλος. Πατήστε το εικονίδιο “Stop”.

## Επεξεργασία μετρήσεων

1. Εξάγετε τα δεδομένα του πειράματος (χρόνο, πίεση, όγκο και θερμοκρασία ) σε αρχείο .csv.
2. Ανοίξτε ένα πρόγραμμα λογιστικών φύλλων (π.χ. excel) και μεταφέρετε σε αυτό τα δεδομένα. Οι μονάδες θα πρέπει να είναι στο S.I. Με την βοήθεια του προγράμματος θα προσεγγίσουμε το εμβαδόν,  $A$ , του βρόγχου (loop) P-V.
3. Δημιουργείστε μια νέα στήλη (dV) της οποίας κάθε γραμμή θα είναι η διαφορά δύο διαδοχικών κελιών του όγκου (π.χ. =B3-B2). Αυτή η στήλη θα έχει μία γραμμή λιγότερη από την πίεση ή τον όγκο.
4. Δημιουργείστε μια νέα στήλη (dA) της οποίας κάθε γραμμή θα είναι το γινόμενο της πίεσης επί τον διαφορικό όγκο dV (π.χ. =A3\*E3).
5. Προσθέστε όλα αυτά τα πολύ μικρά εμβαδά dA, για να βρείτε το εμβαδόν,  $A$ , του βρόγχου P-V. Το εμβαδόν αυτό θα είναι ίσο με το έργο που παράγει το αέριο σε έναν κύκλο.
6. Εντοπίστε τις πιέσεις  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $P_C$  και  $P_D$ , τις θερμοκρασίες  $T_A$ ,  $T_B$ ,  $T_C$  και  $T_D$  και τους όγκους  $V_A$ ,  $V_B$ ,  $V_C$  και  $V_D$ .

## Συμπεράσματα – Παρατηρήσεις

1. Σε ποιες από τις τέσσερις μεταβολές του κύκλου που εκτελέσατε, το αέριο απορροφά θερμότητα; Υπολογίστε την συνολική θερμότητα,  $Q_{in}$ , που απορρόφησε το αέριο.

2. Υπολογίστε την απόδοση Carnot μιας μηχανής που δουλεύει μεταξύ των θερμοκρασιών που δουλεύει και η μηχανή του πειράματος. Επίσης, υπολογίστε την απόδοση που έχει η μηχανή του πειράματος. Τι παρατηρείτε;

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- i. <http://www.ohio.edu/mechanical/stirling/me422.html>
- ii. [http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Stirling_engine)
- iii. I. Urieli, D. Berchowitz - “Stirling cycle engine analysis”, Hilger, 1984
- iv. Ν. Μπορμπιλιάς – “Εισαγωγή στις μηχανές Stirling”, Αθήνα 2005
- v. G. Walker – “Stirling Engines”, Claredon Press, Oxford 1980
- vi. G. Walker – “(The International Cryogenics Monograph Series) Cryocoolers\_ Part 1\_ Fundamentals”, Springer US 1983
- vii. G.Reader, C.Hooper – “Stirling Engines”, E&F N Spon, London 1983

## ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

- i. <https://sprg.ssl.berkeley.edu/~tohban/wiki/index.php/Cryocooler>
- ii. <https://www.sunpowerinc.com/products/stirling-cryocoolers/cryotel-cryocoolers/spacecryocoolers>
- iii. Stirling engine made with coca cola (4:57) [https://www.youtube.com/watch?v=gYfrKMgy\\_Pg&t=12s](https://www.youtube.com/watch?v=gYfrKMgy_Pg&t=12s)
- iv. Simple Stirling engine (3:16) <https://www.youtube.com/watch?v=VdccjzMGtnA>
- v. Stirling Engine Cryocooler (4:59) [https://www.youtube.com/watch?v=xrbCo\\_P1VjA](https://www.youtube.com/watch?v=xrbCo_P1VjA)
- vi. Heat of your hand Stirling engine (1:55) <https://www.youtube.com/watch?v=zCGTNArwJ0s&t=56s>
- vii. How Does a Sunpower Stirling Cryocooler Work? Sunpower Free-Piston Stirling Cryocooler Animation (3:00) <https://www.youtube.com/watch?v=ZSJFPb8030g>

## ΣΗΜΕΙΩΣΗ:

Η άσκηση ‘ Μηχανή Stirling’ εμπλουτίστηκε με εκπαιδευτικό περιεχόμενο, επιστημονικά στοιχεία και βιβλιογραφία από τον Δρ Γεώργιο Δόγκα.

